

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Süsihappegaasi- ja metaanivoog kõdusookaasikute mullast

Merilin Mägi

Juhendajad: Martin Maddison (PhD)
Ülo Mander (PhD)

Tartu 2021

Annotatsioon

Süsihappegaasi- ja metaanivoog kõdusoo kaasikute mullast

Kasvuhoonegaaside voogude uurimine on saanud suure tähelepanu viimastel aastatel. Peamiselt uuritakse kuivendatud sooalasid, mis võivad muutuda süsiniku sidujatest selle emiteerijaks. Antud bakalaureusetöös uuriti 2-aastase perioodi jooksul süsihappegaasi- ja metaanivooge Järvelja piirkonnas kolme kõdusookaasiku mullast. Töö üks eesmärk oli välja selgitada CO₂ ja CH₄ aastane emissioon kõdusookaasikute mullast. Analüüsi voogude aastate vahelist varieeruvust ning leiti kasvuhoonegaaside sidumise ja emiteerumise seosed mulla- ja õhutemperatuuriga, veetasemega, mullaniiskusega ning kaugusega kuivenduskraavist. Nii süsihappegaasi- kui metaanivoogudel leiti oluline seos nii õhu- kui mullatemperatuuriga. Töös sai kinnitust, et kõrgem temperatuur soodustab CO₂ lendumist kõdusoo kaasikute aladelt ning metaani puhul kehtis vastupidine seos. Oluline oli emissiooni suuruse juures veetaseme pidev kõikumine sesoonselt.

Märksõnad: CO₂, süsihappegaas, CH₄, metaan, metsaökosüsteem, mullahingamine, mullaniiskus, temperatuur, kõdusookaasikud, kuivendamine

CERCS kood: P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Carbon dioxide and methane flows from drained birch forest soils

Greenhouse gases emissions have received a lot of attention in recent decade. One of major targets are drained swamps, which can become carbon source instead of sink. In this bachelor's thesis, carbon dioxide and methane fluxes from three drained forest soil in the Järvelja Bog. Greenhouse gas sampling period lasted over two years. One of the aims of the study was to determine the annual emissions of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) from drained birch soils. The variability of greenhouse gas fluxes was analyzed between years and were found correlations between gas emissions and soil temperature, air temperature, water level, soil moisture and distance from the drainage ditch. CO₂ and CH₄ fluxes were significantly related with soil and air temperature. The results confirmed that higher temperatures increase the

emission of CO₂ from soil and sequestration of CH₄ into drained birch forest soil. The frequent fluctuation of water level affects the amount of greenhouse gas emissions.

Keywords: birch, carbon dioxide, drained forest, greenhouse gas flux, methane

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	6
1. Kasvuhoonegaaside CO ₂ ja CH ₄ vood kuivendatud metsamullast	8
1.1. Süsihappegaasi voog kuivendatud metsamullast.....	8
1.2. Metaani voog kuivendatud metsamullast.....	9
1.3. Metsade kuivendamine.....	12
1.4. Veerežiimi mõju kuivendatud turvasmullale.....	13
1.5. Puuliigi mõju CO ₂ ja CH ₄ voogudele	14
2. Materjal ja metoodika.....	16
2.1 Uurimisala kirjeldus	16
2.2 Välitööde metoodika	17
2.3 Statistiline analüüs.....	18
3. Tulemused	19
3.1 Kasvuhoonegaaside vood kuivendatud kaasiku mullast.....	19
3.1.1 Süsihappegaasi emissioon kuivendatud kaasiku mullast	19
3.1.2 Metaani voog kuivendatud kaasiku mullast.....	20
3.2. Keskkonnaparameetrid uurimisaladel	22
3.2.1 Mullatemperatuur uurimisaladel	22
3.2.2 Veetase uurimisaladel	25
3.2.3 Mullaniiskus uurimisaladel.....	27
3.3. Süsihappegaasivoogude seos keskkonnaparameetritega	29
3.3.1 CO ₂ voo seos mullatemperatuuriga.....	29
3.3.2 CO ₂ voo seos õhutemperatuuriga	30
3.3.3 CO ₂ voo seos veetasemega	31
3.3.4 CO ₂ voo seos mullaniiskusega.....	32

3.3.5 CO ₂ voo seos kuivenduskraavi kaugusega.....	33
3.4 Metaanigaasivoogude seos keskkonnaparametritega.....	36
3.4.1 CH ₄ voo seos temperatuuriga	36
3.4.2 CH ₄ voo seos veetasemega	37
3.4.3 CH ₄ voo seos mullaniiskusega	38
3.4.4 CH ₄ voo seos kuivenduskraavi kaugusega	38
3.5. CO ₂ ja CH ₄ aastane voog	41
3.5.1 CO ₂ aastane voog	41
3.5.2. CH ₄ aastane voog	41
4. Arutelu.....	43
4.1 CO ₂ voog.....	43
4.2 CH ₄ voog.....	45
Kokkuvõte	48
Summary	50
Tänuavaldused.....	53
Kirjandus	54
Lisa 1.....	57

Sissejuhatus

Ligikaudu kolmandiku maailma metsaalast katavad boreaalsed metsad, mis on umbes 66% maailma metsamulla süsiniku (C) varudest (Köster *et al.*, 2018). Märgalad hõivavad 5% Maa maismaast ja on suurimad looduslikud metaani (CH₄) allikad, moodustades 20–40% ülemaailmsest CH₄ emissioonist. (Clément *et al.*, 2020). Metsastunud turbaalad talletavad süsinikku surnud juurte ja varise kaudu pinnasesse (Gutenberg, 2019).

Turvasmuldade kuivendamisel mullahingamine oluliselt intensiivistub, mistõttu kuivendusjärgselt kujunevad alad süsihappegaasi (CO₂) allikateks. Liigniisked, niisked ning kuivendatud mullad emiteerivad peale CO₂ ka metaani (CH₄) (Ernfors *et al.*, 2020). Kuivendamine ehk veerežiimi muutmine on üks tegur, mis soodustab süsihappegaasi lendumist märgalalt. Kasvuhoonegaaside lendumist märgaladelt mõjutab veel pH, temperatuur, C substraadi kvaliteet, toitainete kättesaadavus ja hapnikusisaldus. (Clément *et al.*, 2020) Märgalade hüdroloogia muutmine inimese poolt, põhjustab mulla kuivenemist, mis soodustab kogunenud süsinikuühendite oksüdeerumist, muutusi taimeliikide koostises ja kasvuhoonegaaside heitkoguste suurenemist (Gutenberg, 2019).

CO₂ ja CH₄ voogude peamised mõjutajad on mulla ja taimestiku omadused (mulla poorsus, taimestiku gaaside sidumisvõime jne), sealhulgas mullaniiskus ja üleujutused, märgalade või metsade tüüp ning mullakeemia. Suures veesoos on mõõdetud mulla hingamist, kus leiti, et liigniiske pinnas on CH₄ allikas ja kuivuse ajal toimivad mullad gaasi hoidlana, samas kui kuiv metsamuld toimis vastupidiselt (Gutenberg, 2019). Põhjavee taseme langedes sügavamale pinnasesse metaani emissioon mullast lakkab ja lendumise asemel võib muld hakata metaani siduma (Vainio, 2019).

Maanso (2015) magistritööle täienduseks analüüsitakse mitme aasta CO₂ ja CH₄ emissiooni tulemusi sookaasikute mullast. Lõputöö peamine eesmärk on analüüsida sookaasikute mullast emiteeruvate CO₂ ja CH₄ voogude mõjutegureid, vastates neljale uurimisküsimusele:

Kui suur on CO₂ ja CH₄ emissioon sookaasikute mullast?

Milline on seos CO₂ ja CH₄ ning keskkonnaparametrite vahel?

Kui palju varieeruvad CH₄ ja CO₂ vood kahe aasta vahel?

Kui palju varieeruvad CH₄ ja CO₂ vood erinevatel kaugustel kuivenduskraavist?

Käesoleva töö teoreetilises osas käsitletakse kasvuhoonegaaside voogusid looduslikest ja kõdusoometsadest, metsakuivendamise vajadust ja ajalugu, veerežiimi reguleerimise mõju kuivendatud keskkonnale. Ühtlasi tutvustakse peapuuliigi mõju kasvuhoonegaaside emissioonile.

1. Kasvuhooonegaaside CO₂ ja CH₄ vood kuivendatud metsamullast

1.1. Süsihappegaasi voog kuivendatud metsamullast

Süsinikuringe on aktiveerunud süsinikdioksiidi (CO₂) taseme tõusuga, mis on tingitud inimtekkelistest protsessidest. Süsihappegaasi ühendid on kõige säilivamad ookeanis ja maismaal. Suurel laiuskraadil asuvad ökosüsteemid on C-hoidlad, mis seovad fotosünteesi abil atmosfääri süsinikdioksiidi ja vabastavad selle aeglaselt lagunevast orgaanilisest ainest, kuid isegi väikesed muutused nendes suurtes ökosüsteemides võivad esile kutsuda olulisi muutusi gaasi tasakaalu muutumises atmosfääris (Köster *et al.*, 2018; Bonan, 2008). Parasvöötmes ja boreaalsetes piirkondades on talvise aastase hingamise CO₂-heite osakaal 10–40% (Viru, 2020). Energiat tootvad tuumajaamad on maapealsed suurimad CO₂ tekitajad, moodustades 50% lenduvast süsinikdioksiidist (Bonan, 2008).

Süsinikuringel on oluline mõju kliima muutustes ja globaalsel soojenemisel. Süsinikuringe esineb hüdro-, strato- ja atmosfääris. Kliimasoojenemise ja süsinikuringe vahel on leitud positiivne korrelatsioon, mida võimendab inimkonna elutegevus (Bonan, 2008).

Atmosfääri jõuab CO₂ inimtegevuse kaudu fossiilsekütuste põletamisel. CO₂ (eluiga 300-1000 a.) ühendid püsivad atmosfääris pikemalt kui metaani (10 aastat) omad. Pikk viibeaeg soodustab lühilainelise päikesekiirguse neeldumist CO₂ osakestes. Kiirguse selektiivse neeldumise tõttu viib atmosfääri suurenenud kontsentratsioon pinnatemperatuuri tõusuni. Atmosfääri kontsentratsioonide kahekordistumine CO₂ tooks kaasa globaalse keskmise temperatuuri tõusu. Suurtel laiuskraadidel toimub märkimisväärne amplituudi muutus temperatuuris (Nordhaus, 1977).

Süsiniku lendumist märgalalt mõjutab turba toitainete sisaldus ja pinnavee tase. Madal põhjavesi ja toitainete suur varu soodustab suuremat süsihappegaasi lendumist, kui tavatingimused. Soomes tehtud uuring näitas, et heterotroofse pinnasega hingamise optimaalne põhjavee tase on 61 cm, kus mullafloora ja -fauna elutegevuseks ja hingamiseks kuluvat süsinikku suudab kasutada (Ernfors *et al.*, 2020). Heterotroofsusena käsitletakse mullafloora ja -fauna hingamiseks kasutatud süsinikku. Külmematel kuudel metaboolne aktiivsus väheneb ja mulla niiskus suureneb, mis vähendab CO₂ difusiooni, soodustades gaasi sidumist (Gutenberg, 2019). Kui paks lumekiht soodustab muldadel soojemat ja niiskemat keskkonda, mis võib suurendada heterotroofset hingamist. Õhukese või puuduva lumekatte korral võivad mullad külmuda sügavamalt ja põhjustada väiksemaid CO₂ heitkoguseid. (Viru, 2020) Hooajaliselt sulanud pinnas

koos temperatuuri tõusuga, intensiivistab lagunemis aktiivsust ja suurendab gaasi emissiooni sulanud pinnasekihist (Köster *et al.*, 2018). Mulla süsinikdioksiidi voog sõltub mulla niiskusest, temperatuurist ja metsa tüübist, mida kõik mõjutavad inimtegevusest tulenevad tegevused turbaaladel (Gutenberg, 2019). Happelised mullastiku tingimused võivad põhjustada madalamaid mulla CO₂ heitkoguseid ja optimaalse süsinikdioksiidi heitmete pH-d peetakse neutraalseks (Köster *et. al.*, 2018).

Turba ülemisel kihil (kuni 50 cm) on turbaalade CO₂ tootmisel oluline roll, sest seal on suurem orgaanilise aine olemasolu ja hapnikul on parem juurdepääs. Vähendades turbasambla osa (juured) ja sealset taimestikku ilma kuivendusega, ei muutu CO₂ heitekogused suuremaks, vaid on väiksemad kui kuivendatud alal. Külmakahjustusega peened juured, muutuvad oluliseks süsiniku allikaks mikroorganismidele (Viru, 2020).

CO₂ emissioon turbamullas on seotud orgaanilise aine lagunemisega ja taimejuurte hingamisega, mis on ülemaailmse maismaa C-tsükli peamine komponent. Orgaanilises kihis laguneva orgaanilise aine koguse aeglane taastumine on oluline põhjus CO₂ heitekoguste vähenemisel (Köster *et al.*, 2018). Süsihappegaasi peamine levimistee atmosfääri on difusioon (Belger *et al.*, 2011). Tulenevalt ökosüsteemidest ja mullatüübist on süsihappegaasi sidumine ja emissioon erinevad (Viru, 2020).

Kõrge veetase muudab samuti ebasootsaks CO₂ oksüdeerumise turbas, mille tulemuseks oli madalam CO₂ emissioon kuivendatud ja kraavi lähedalt aladelt (Viru, 2020). Gutenbergi (2019) uurigus leiti, et CO₂ heide vähenes mulla niiskuse suurenemisega.

1.2. Metaani voog kuivendatud metsamullast

Metaan (CH₄) on tähtsuselt teine kasvuhoonegaas (kui mitte arvestada veeauru) peale süsihappegaasi (CO₂) (Boer, 2008). Metaani ühendi molekul ja mass muudavad gaasi efektiivsemaks kasvuhoonegaasiks võrreldes teiste gaasidega (suurem soojusmahtuvus) (Wuebbles *et al.*, 2002). 1997. aastal sõlmitud rahvusvahelises Kyoto protokollis on välja toodud metaani vähendamist soosivad abinõud (Boer, 2008). Liigne metaani kogus Maa atmosfääris pärsib soojuskiirguse tagasi peegeldumist kosmosesse, hajudes kõrgemates atmosfääri kihtides. Hajumine atmosfääris soodustab soojuskiirguse säilimist ja ringlust, mis seostatakse kasvuhooneefektiga (Rafferty, 2021).

Metaani eluiga atmosfääris on üpriski lühike – 10 aastat. Metaan on troposfääri kõige sagedamini reageeriv gaas ja selle reaktiivsus on oluline nii troposfääri kui ka stratosfääri keemias (Wuebbles, 2002). „Lühike eluiga on tingitud metaani reageerimisest hüdroksüüli radikaaliga OH“ (Univer, 2020). Metaani kontsentratsiooni suurenemisel hüdroksüüli radikaalid (OH^\cdot) vähenevad ja CH_4 eluiga pikeneb atmosfääris. Hiljem laguneb metaani ühend atmosfääris süsihappegaasiks ja veeauruks (Rafferty, 2021).

Looduslikud ja inimtekkelised CH_4 heitkogused on hinnanguliselt samas suurusjärgus (Saunois *et al.*, 2016). Erinevate ökosüsteemide ja atmosfääri vahel toimub kasvuhoonegaaside tootmine või tarbimine näiteks läbi mikroobide või keemiliste reaktsioonide mullast või puudelt. Seetõttu on metsamulla voog CH_4 tootmise ja tarbimise tulemus mullas. Ülemaailmselt on märg turbamuld suurim looduslik CH_4 allikas, näiteks metsamuld ja rohumaad on aga suurimad CH_4 emissiooniga allikad (Vainio, 2019). Looduslikult satub metaani atmosfääri vähestes kogustes ka vulkanismi ja termiidide seedimise tagajärjel, ookeanipõhjas olevate ventilatsiooniavade ja metaanhüdraatide ladestumise tõttu (Rafferty, 2021). Looduslikult tekib metaan anaeroobses liigniiskes keskkonnas lagunemisprotsessi käigus, mida soodustab sealne bakteriaalne tegevus. Metaani moodustumine toimub anaeroobses keskkonnas metanogeneesi teel, kui setted on üle ujutatud. Metaani moodustumisel ja säilimisel on suur tähtsus settematerjali omadusel. Kui settematerjal asub mudases keskkonnas, moodustub ja säilib metaani rohkem võrreldes liivase keskkonnaga (Belger *et al.*, 2011).

CH_4 oksüdeerivad bakterid nimetatakse metanotroofideks ja CH_4 tootvad arheed nimetatakse metanogeenideks. Makrofüüdid transpordivad metaani atmosfääri läbi rohttaimede aerenhüümide. CH_4 oksüdeerivad bakterid on võimelised kasutama süsiniku- ja energiat allikana. CH_4 tootmine on orgaanilise aine lagunemise osa, kus CH_4 moodustub, sest metanogeenid kasutavad energiaallikatena atsetaati ja vesinikku. Metanotroofia (CH_4 oksüdeerumine metanotroofide poolt) puhul peab orgaanilise materjali lagunemisel olema tagatud hapniku ligipääs. Metanogenees (metanogeenide poolt CH_4 tootmine) on anaeroobne protsess. Seega toimub metanotroofia anoksilise metanogeense pinnase kohal asuvatel pinnakihtides, kus CH_4 on hõlpsasti kättesaadav (Vainio, 2019). (Vainio, 2019) Seetõttu pärineb valdav osa CH_4 heitkogustest hapnikuvaesetest keskkondadest, näiteks märgaladest ja riisipõldudest. (Saunois *et al.*, 2016).

Erinevused setete ja taimestiku leiukohtade vahel mõjutavad metaani levimist läbi aerenhüümide. Maapind, mis pole pidevalt liigniiske, soodustab hapniku ligipääsu ja sellega

taime juurte arengut. Suur taimede juurte olemasolu viib pinnasesse rohkem hapniku ja pärsib metaani emissiooni läbi taime aerenhüümide. Aerenhüümide hingamise viis ei ole kõige levinum metaani koguste hindamiseks ja on alati väiksema osakaaluga (Belger *et al.*, 2011). Mittemikroobsed CH₄-heitmed on seotud erinevat tüüpi keskkonnastressiteguritega (näiteks UV-kiirguse suurenemine ja temperatuuri kasv) ja sellest tulenevate reaktiivsete hapnikuliikide tootmisega. Taimede füüsilised vigastused võivad samuti suurendada gaaside heidet (Vainio, 2019). Sagedamad külmumis-sulatumistsüklid suurendavad CH₄ heitkoguseid, kuna mulla külmumine lõhub peeneid juuri ja mulla mikroobikooslusi (Viru, 2020).

Metaan levib atmosfääri kolmel erineval viisil: poorivee difusioon, mullitamine (ebulatsioon) ja transport läbi rohttaimede aerenhüümide. Leitud on ka neljas metaani levimise viis atmosfääri läbi puujuurte ja märgala pinnase (Gauci *et al.*, 2010). Kõige levinum metaani atmosfääri levimise viis on mullitamine, sest mullitamise reaktsiooni käigus on CH₄ kadu kõige väiksem (Belger *et al.*, 2011). Mullitamisel eraldudes on oluline veetaseme langus ja sellega kaasnev hüdrostaatilise rõhu langus pinnases (Belger *et al.*, 2011).

Kuivendamine häirib tavapärasest veerežiimi ja toitainete sisaldust mullas. Häiring mõjutab omakorda taimestiku koosseisu ja pärsib CH₄ emissiooni (Ernfors *et al.*, 2020). Kõrge põhjavesi pärsib metaani teket mullas ja muudab keskkonna heterotroofseks, kus ei ole soodustatud hapniku ja toitainete moodustumine. Kõrge põhjavesi soodustab niiske keskkonna teket ja sellega kaasneva metaani emissiooni suurenemist. Maapind, millel esineb pidev alaline liigniiskus, toodab rohkem CH₄ ühendeid kui ajutise (hooajaline) liigniiskuse all olev pinnas. (Belger *et al.*, 2011). Niiskuse muutumisel võib metaani hoidlast saada hoopis allikaks (Vainio, 2019). CH₄ osakaalu suurenemisel mullas on seos kõrge pH tasemega (Ernfors *et al.*, 2020).

Mullatingimuste muutused veetaseme osas anaeroobsest aeroobseks ja vastupidi võivad viia CH₄ dünaamika nihkumiseni, põhjustades erineva tugevusega vooge järjestikustel aastatel (Vainio, 2019). Määramatuse vähendamine ülemaailmses gaaside eelarve arvutuses, nõuab täpsemaid ja rohkem uuringuid ökosüsteemi tasandil. Tuleks parandada CH₄ tekke ja tarbimisprotsesside mudeleid kaasates erinevaid keskkonnaparameetreid.

1.3. Metsade kuivendamine

Metsad moodustavad 30% maismaast ja on üks suurimaid süsinikku siduvaid ökosüsteeme Maal. Metsad ei soodusta kasvuhooneefekti teket, kui neid õigesti majandada ja mitte tekikada soode arvelt. Aina rohkem on hakatud tähelepanu pöörama metsade uuendamisele ja tulekahjude ära hoidmisele, et suurendada metsade süsiniku sidumisvõimet (Bonan, 2008). Esimeste suuremahuliste metsakuivendustöödega alustati juba 19. sajandil, et suurendada metsatootlikust Skandinaavias ja Venemaal. Metsamaadeks muudeti 15 miljonit hektarit märgalasi, mis moodustavad 90% boreaal sooladest. Eestis kuivendati soid algselt põllumajanduslikel eesmärkidel. (Kaisel & Kohv, 2009)

Läbi aastate on märgaladest saanud põllu- ja metsamaad, mille käigus muudetakse märgala niiskuserežiimi. Niiskuserežiimi muutmisel kasutatakse peamiselt kuivendamise meetodeid. Kuivendamisel tuleb jälgida süsiniku taseme muutuseid, mis soodustavad kasvuhoonegaaside hulga suurenemist atmosfääris (Clément *et al.*, 2020). Orgaanilised mullad on ülemaailmselt ulatuslikud süsinikvarud. Turbaalad on suurim looduslik maapealne süsinikvaru. Kui turbaalad on kahjustatud – näiteks kuivendatud või turba kaevandamiseks kasutatavad – muutuvad need hoidlate asemel kasvuhoonegaaside allikaks (Viru, 2020).

Olenevalt biomassi produktsiooni suurusest võivad kuivendatud metsad süsinikku siduda või emiteerida (Ernfors *et al.*, 2020). Kuivendatud muldadel kasvava biomassi suurus sõltub mulla kvaliteedist (Bonan, 2008).

Kõige efektiivsem on kuivendada lodumetsi, madalsoometsi ja siirdesoometsi. Kõrge kuivendusefektiivsusega kasvukohatüüpide puistu boniteet paraneb kahe kuni kolme klassi võrra. Toitainete vaesemad kasvukohatüübid ei tõuse esile kiirema või parema puistuga pärast kuivendamist (Kaisel & Kohv, 2009).

. Kuivendusjärgselt kasvab pealmiste turbakihtide aeratsioon, mis suurendab mikroobset aktiivsust (Kaisel & Kohv, 2009). Suurem mulla õhustatus, mis on tingitud kuivendamisest, soodustab turbakihi lagunemist ja toitainete mineralisatsiooni (Clément *et al.*, 2020; Kaisel & Kohv, 2009). Soodsamad tingimused taimede jaoks kiirendavad puistukasvu. Veetaseme vähenemine põhjustab turba kokku langemise ehk tihenemist. Tihenemine on eriti suur kraavi lähedal, mis nõrgeneb kraavist kaugenedes. Turbakihi tüsedusest sõltub kuivendamisel kõduneva

materjali kogus – mida paksem on turbakiht, seda rohkem orgaanilist materjali hakkab lagunema niiskusežiimi muutumisel (Kaisel & Kohv, 2009).

Täieliku kuivendamise tagajärjel on turbametsade põhjavee tase tavaliselt alla 30–50 cm pinnast. Kuid kevadel võib põhjavee tase olla maapinna lähedal ja soodustada üleujutusi. Aprillist oktoobrini võib põhjavee tase kõikuda, seda mõjutavad peamiselt sademed. Lame reljeef võib olla põhjus, miks kraavi vool aeglustub, samas võivad häirida voolu ka kibraste rajatud tammid (Clément *et al.*, 2020).

Lagunemisel paiskub atmosfääri suures koguses CO₂ ja CH₄. Niiskuse vähenedes ja halva veevarustuse korral (näiteks vee juurdepääsu kaugus), anaeroobne keskkond kaob ning seega pole sel hetkel soodustatud metaani tootmine ja lendumine. Aeroobse lagunemise lõpptulemusena paiskub õhku CO₂ ühendeid ja anaeroobses keskkonnas on CH₄ ühendite lendumine. (Clément *et al.*, 2020; Ernfors *et al.*, 2020).

1.4. Veerežiimi mõju kuivendatud turvasmullale

Kuivendamisel alandatakse veetase vastavalt mulla kõdunemis astmele ja soo staadiumile. Kui pinnas on soostumise alguses, siis langetatakse veetaset vaid 35 cm, kuid välja kujunenud soos on vaja langetada veetaset 60 cm, et muuta mulla keskkonda. Veetaseme alandamine peab olema pidev protsess, et saavutada parem puistu boniteet ja kiirendada puude kasvu, et toimuks suurem CO₂ ja CH₄ sidumine. Kui mitte pidevalt veerežiimi hooldada 10–15 aasta möödudes, langevad kuivendatud kasvukoha kasvutingimused ja emissiooni tasemed tõusevad (Kaisel & Kohv, 2009).

Kuivendamine mõjutab kogu kraavitud ala ja sellest kaugemale jäävat ümbrust. Pinnase veetaseme alandamine ja mulla veemahutavuse muutmine mõjutavad ümbritsevate alade veerežiimi. Veerežiimi mõjutades muudetakse ümbruse mikrokliimat, elupaikade omadusi, taimestikku ja loomastikku. Ümbruse muutumisele reageerib väiksem kuivendatud soo tõhusamalt kui ulatuslik soomassiiv (Kaisel & Kohv, 2009). Mullaniiskuse vähenemine on veel üks lagunemiskiirust suurendav tegur, mis suurendab kasvuhoonegaaside heitekoguseid (Köster *et al.*, 2018).

Drenaaž põhjustab turbasse kogunenud orgaanilise aine intensiivset mineraliseerumist, mille tulemuseks on kuivendatud alalt märkimisväärne süsiniku (C) ja taimetoitainete kadu, samas kui CH₄ heitkogused tavaliselt vähenevad (Viru, 2020). Kuivendusega vähendatakse põhjaveega

katioonide sissevoolu, pealmise turbakihi aeratsiooni kasvades vabastatakse orgaaniliste ning anorgaaniliste (Fe, S ja Al) oksüdatsiooniprotsesside mõjul süsteemi prootoneid, mistõttu muutub pinnas aina happelisemaks taimestiku elutegevuse tõttu (Kaisel & Kohv, 2009). Pinnase niiskus, veetase ja mullapoorid põhjustavad erinevatel puuliikidel erinevaid gaasi voolukiirusi (Vainio, 2019).

1.5. Puuliigi mõju CO₂ ja CH₄ voogudele

Kasvuhoonegaaside voo muutus sõltub suures osas metsa tüübist ja mulla viljakusest. Peamiselt on uuritud kuivendatud okaspuumetsade kasvuhoonegaaside heite koguseid. Kuivendatud lehtpuumetsade heitekogused võivad erineda okaspuupaikade heitmest, sest metsa taimestik mõjutab mulla omadusi. Näiteks kuuse ja männi mulla C–N suhe on oluliselt kõrgem kui kase puistu mullal. Laialeheliste puude varist on lihtsam lagundada kui okaspuude omasid. Lehtpuude varis sisaldab rohkem N ja vähem fenoolühendeid, mis suurendab mikroobide populatsioone ja lagunemiskiirust. Kase juurte hingamine on lehisega võrreldes umbes kaks korda suurem. Samuti on täheldatud laialehiste puude, nagu kask ja lepp, okaspuudega võrreldes suuremat juurte hingamist. Kased on tuntud ka lühema eluea poolest võrreldes paljude teiste puuliikidega, mille eluiga on maksimaalselt 60–80 aastat. Kösteri 2018. aasta vaatlustest selgus, et kase ja lepa puu biomass oli 56 aastat tagasi põlenud alal oluliselt suurem ja seal piirkonnas mõõdeti ka kõrgeimad CO₂ heite väärtused. Teises piirkonnas, kus polnud palju laialehelisi puuliike oli süsihappegaasi emissioon väiksem. Teatud taimeliikide (näiteks põõsaste ja okaspuude) pH on madalam ning see sisaldab spetsiifilisi ühendeid, mida on raske lagundada (Köster *et al.*, 2018).

Liigniiskes keskkonnas teevad taimede juured mitut tüüpi kohandusi hapniku saamiseks. Näiteks aerenhüümi koed, mis võimaldavad gaaside transportimist juurte ja võrsete vahel. Osad parasvöötmes olevad märgala liigid eraldavad vartest CH₄. Seisvad surnud puud võivad ka olla olulised CH₄ allikad märgalade (Vainio, 2019).

Taime CH₄-emissiooni protsesside taga olevad tegurid on veel segased. Kuid teada on, et märgaladel võib taime vahendatud metaani transpordi osakaal olla märkimisväärne või isegi peamine rada kogu voos. Erinevatel taimeliikidel on erinev võime metaani transportida ja seega võib taimede liigiline koostis mõjutada kogu CH₄ voo määra (Vainio, 2019).

Kui vaadata koos otsest (mitte-mikroobne) ja kaudset (näiteks transport mullast, südamepuu) metaani emissiooni, siis katab taimeistik CH_4 heitest hinnanguliselt 5–22% (Carmichael *et al.*, 2014). Varre heitkoguste varieerumine on seotud puude vanuse ja varre läbimõõduga, mis soodustavad suurema või väiksema gaasi transpordi raja. Puude panus CH_4 voos on endiselt vähe teada ja endiselt ebakindel, mis on tingitud kehvast protsesside mõistmisest ja puuduvatest seostest CH_4 voogude ja keskkonnamõjurite vahel (Vainio, 2019) .

Taimestiku taastumine või suurenemine võimaldab muldadel jahtuda ning aktiivse kihi sügavus väheneb, mis mõjutab CO_2 ja CH_4 voogusid mulla ja atmosfääri vahel (enamasti väiksemaks). Taimestiku edasine areng ja vananemine, soodustab kasvuhoonegaaside lendumist, kuna juurte hingamine ning surnute puude osakaal suureneb. Niipea kui taimeistik ja juurestik taastuvad või uuendatakse (umbes 25 aasta pärast), vähenevad ka CO_2 heitkogused (Köster *et. al.*, 2018).

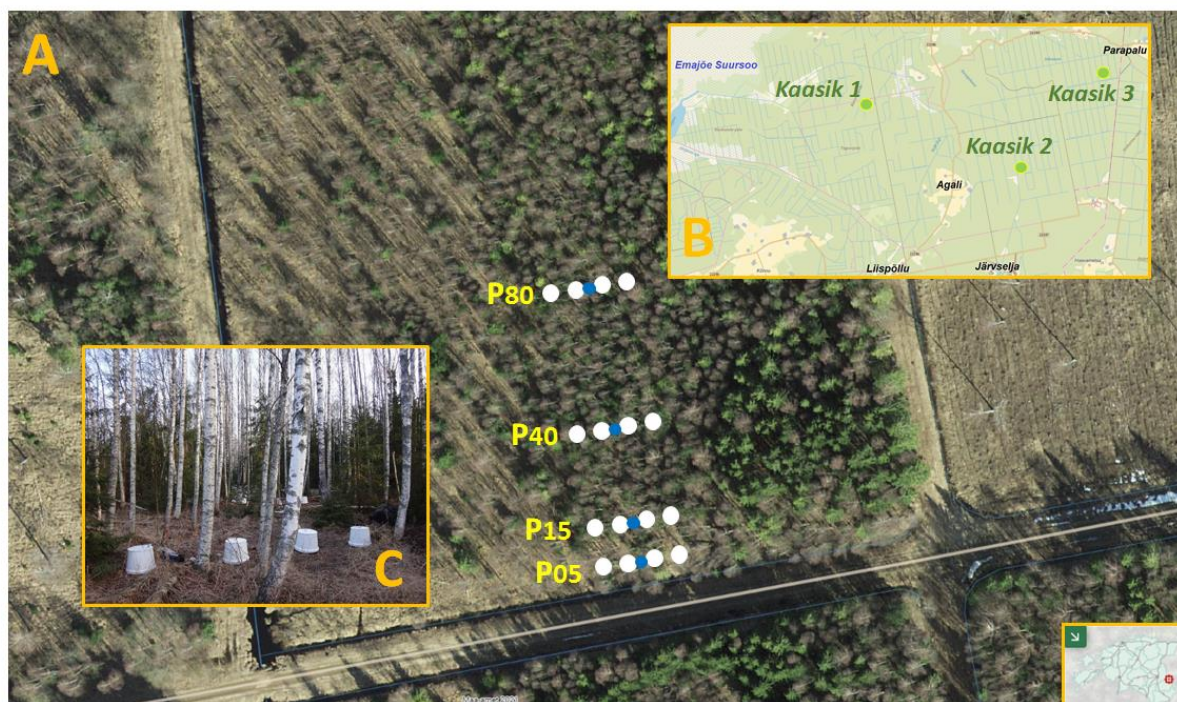
. Süsinik seotakse noores metsas ja samas koguses toimub süsiniku emissioon vanemas metsatüübis tagasi atmosfääri. Erinevad metsatüübid toodavad kasvuhoonegaase vähem võrreldes põldudega, kus vähene taimeistik soodustab gaaside lendumist. Metsad takistavad vee jõudmist pinnasesse. Madala albeedo tõttu on päikese kiirgust vähe ja temperatuurid püsivad ühtlased ning madalad (Bonan, 2008).

2. Materjal ja metoodika

2.1 Uurimisala kirjeldus

Järvelja metsa kogupindala on 10 553 hektarit, millest 6626 ha on metsamaad ja 3147 ha moodustavad sood ja ülejäänud pindalast on kaitse all. Metsa alad paiknevad lõunapoolses osas ja sood/soosaared jäävad põhjapoolsesse osasse. Kogu metsa pindalast 41% on kaitse all. Peamised metsakasvukohatüübid on madalsoo, angervaksa, jänsekapsa-mustika ja jänsekapsa-kõdusoo. Järvelja metsadest moodustavad enamiku kaasikud (59%). Kraavide rajamisega ja kuivendustega on sealsed metsamaad suurenenud soode arvelt alates 1883. aastast (Kask, 2014). Drenaažisüsteem põhineb avatud kraavivõrgul, mis rajati 50 aastat tagasi Järveljal (Clément *et al.*, 2020).

Uuring viidi läbi Järvelja õppe- ja metskonna kõdusoometsades kolmel katseala, mis jäid Tartu maakonna kaguosas Peipsiäärsele madalikule. Uuring viidi läbi kolmes kuivendatud kaasikus. Uurimisalade paiknemine skeem ja pilt suletud pimekambritest on välja toodud joonisel 1.



Joonis 1. Kasvuhoonegaaside mõõtmiskohtade (P5, P15, P40, P80) skeem uurimisaladel (A; kaart: Maa-amet) koos uurimisalade (Kaasik 1, Kaasik 2, Kaasik 3) paiknemisega (B; kaart: Maa-amet) Järvelja õppe- ja metskonna kõdusoometsades ning pilt (C; foto: Martin Maddison) mõõtmisteks kasutatud suletud pimekambritest uurimisalal.

Uurimisalused kaasikud paiknesid jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüpi kaasikus, mis täpsemalt paiknes Kanajala- ja Sakasoos. Iga uurimisala suuruseks oli 50×100 m maalapp. Koha pinnas oli tüüpiline happelisele turbaalale, kus oli kõrge orgaanilise süsiniku väärtus ja madal pH (Clément *et al.*, 2020). Metsaregistri andmetel esines uurimisalustes kaasikutes sookaske, mille vanus oli 30–40 aastat ning keskmine kõrgus 14–18m. Maa-ameti andmetel oli kaasikutes hästi kuivendatud või lagununud turvasmullad ja esines ka hästi kuivendatud keskmise raskusega gleimuldasi. Kõigi katsealade turba tüsedus ületas 50 cm, mille all paiknes liivsavi või savihorisont (Maa-ameti Geoportaal, 2021. (*Maa-Ameti Geoportaal*, n.d.)

Igale uurimisalale rajati transekt, millel oli neljal erineval kaugusel kuivenduskraavist (5, 15, 40 ja 80m) kasvuhoonegaasi proovide kogumiseks ja veetaseme mõõtmiseks mõõtmispunkt. Igasse mõõtmispunkti paigaldati ühe meetri sügavune põhjaveevaatluskaev. Kaasik 2 alale paigaldati ka automaatne mõõtmisseade veetaseme, mullaniiskuse ja mullatemperatuuri pidevaks mõõtmiseks. Andmed salvestati ühe tunnise intervalliga.

2.2 Välitööde metoodika

Kasvuhoonegaaside proovide kogumiseks kasutati valgeid 65 liitriseid PVC kambreid (diameeter 50 cm, kõrgus 40 cm), mis asetati õhukindlalt 15 cm sügavusele pinnasesse vajutatud veetihendiga plastikrõngale.

Gaasiproovid koguti 50 ml eelevalukeeritud (0,3 mbar) klaaspudelitesse. Esimene proov võeti vahetult pärast kambri paigutamist rõngale (0 minuti proov) ning seejärel 20 minuti, 40 minuti ja 60 minuti proovid nii, et kamber asetses kogu aja segamatult rõngal.

Uurimisaladelt koguti kasvuhoonegaaside proovid kevadel, suvel ja sügisel kolme nädala tagant ning talvel kord kuus. Mõõtmised toimusid kaks aastat (aprillist 2014 kuni 2016 märts). Kokku oli 30 mõõtmiskorda ja koguti 5760 gaasiproovi.

Gaasiproovid analüüsiti Tartu Ülikooli geograafia osakonna laboris. Analüüsimiseks kasutati ECD ja FID detektoritega varustatud gaas-kromatograafi Shimadzu GC-2014 ning Loftfield-tüüpi proovide automaatsisestajat. CO₂ ja CH₄ voog määrati lineaarse regressiooni põhjal, ning arvestati mõõtmiseks kasutatud kambri ruumala ja maapinda paigaldatud rõnga pindala. Täpsem metoodika kirjeldus on toodud Helina Maanso magistritöös (2015).

Igal proovivõtu sessioonil mõõdeti kõigis mõõtmispunktides ka piesomeetrites veetaseme sügavus ning portatiivse mullatemperatuuri- ja niiskuse mõõtmisseadmega mullatemperatuur (0-5, 10, 20, 30, 40 cm) ja –niiskus (0-5 cm).

Töös kasutati Mehikoorma hüdroloogiajaam õhutemperatuuri andmeid, mis saadi Keskkonnaagentuurist.

2.3 Statistiline analüüs

Statistiline andmeanalüüs teostati programmi Statistica 7.0 abil. Tulemuste korrastamiseks, visualiseerimiseks ja süstematiseerimiseks kasutati programmi MS Excel 2007. Olulisusnivooks seati kõikjal andmeanalüüsis $p < 0,05$.

Statistica programmis kontrolliti andmete õigsust ja vastavust normaaljaotusele Kolmogorov-Smirnoffi, Shapiro-Wilki ja Lillieforsi testidega. Testide järgselt leiti, et kasvuhoonegaaside emissioonid ja registreeritud keskkonnaparameetrid ei vastanud normaaljaotusele.

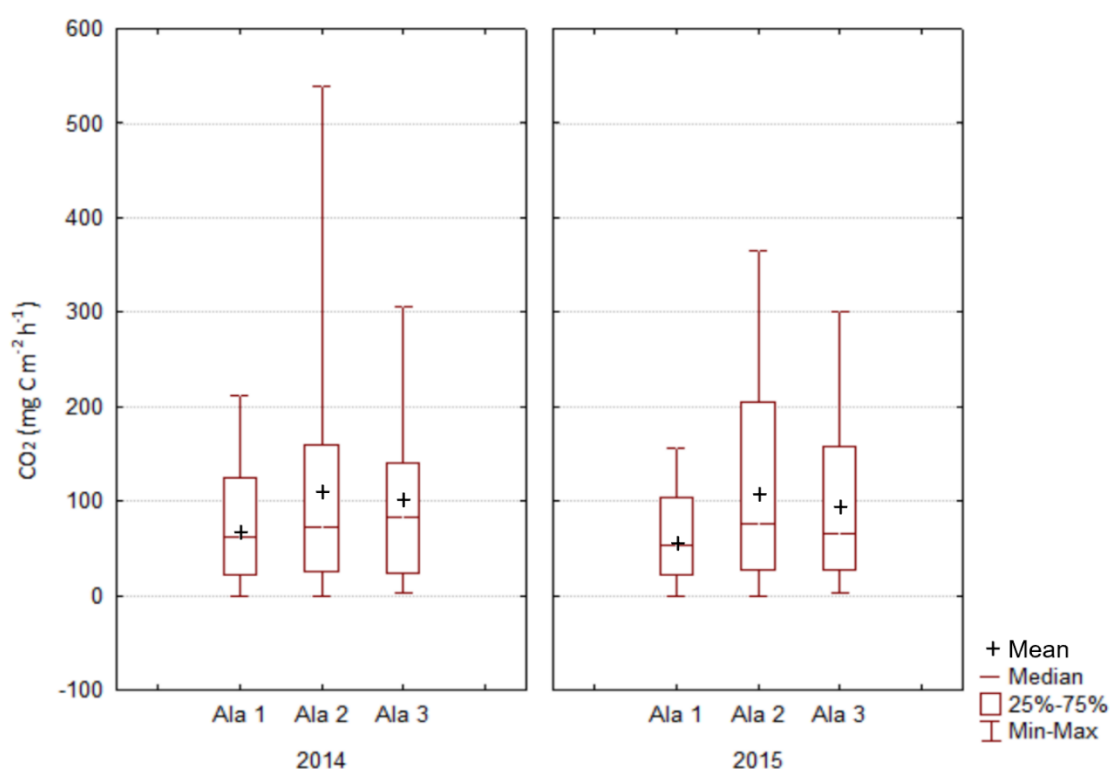
Andmete analüüsil kasutati mitte-parameetrilisi meetodeid. Erinevatelt uurimisaladelt ja kraavikaugustelt mõõdetud kasvuhoonegaaside emissioonide erinevuse hindamiseks Kruskal-Wallis ANOVA testi. Kasutati töös ka Spearmani testi, et leida seost gaasi ja erinevate keskkonnaparameetrite vahel. Paljud ekstreemsed kõikumised CO₂ emissioonides ja CH₄ sidumises, põhjustasid normaaljaotuse puudumise. Veetaseme ja gaaside vahelise seose leidmiseks, asendati väärtusega -200 nende piesomeetrite veetasemed, kus puudus veetase turbakihi. Joonistel on toodud keskmised, mediaan, kvartiilid ja miinimum maksimum vahemikud.

3. Tulemused

3.1 Kasvuhoonegaaside vood kuivendatud kaasiku mullast

3.1.1 Süsihappegaasi emissioon kuivendatud kaasiku mullast

Kahe aasta keskmine CO₂ emissioon kaasikust 1 oli 70,3 mg C m⁻² h⁻¹, mis oli ka kõige madalam võrreldes kahe teise uurimisala sookaasikuga (Joonis 2). Kõige suurem oli keskmiselt emissioon juulis 136,6 mg C m⁻² h⁻¹, augustis 135,9 mg C m⁻² h⁻¹ ja septembris 114,0 mg C m⁻² h⁻¹. Madalaim emissioon 2,8 mg C m⁻² h⁻¹ oli kaasikust 1 veebruaris.



Joonis 2. Süsihappegaasi emissioon (mg C m⁻² h⁻¹) uurimisaladelt 2014. ja 2015. aastal. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max väärtused.

2014. aastal oli CO₂ voog kaasik 1 mullast 77,2 mg C m⁻² h⁻¹, mis oli kõrgem kui 2015. aastal (63,5 mg C m⁻² h⁻¹). See oli madalaim keskmine CO₂ voog aastas võrreldes kõikide kaasikutega. 2015. aasta veebruaris oli CO₂ voog -0,1 mg C m⁻² h⁻¹, mis tähendab, et CO₂ seoti külmunud pinnasesse. Kõrgeimad emissiooni näidud 159,4 mg C m⁻² h⁻¹ ja 141,3 mg C m⁻² h⁻¹ olid vastavalt juulis 2014 ja augustis 2015. Madalaim emissioon oli 5,7 mg C m⁻² h⁻¹ veebruaris 2016.

Kahe aasta keskmine CO₂ emissioon kaasikus 2 oli 110,6 mg C m⁻² h⁻¹, mis ületas teiste kaasikute näite. Kaasik 2 ala vood varieerusid kõige rohkem (Joonis 2). Suurimad süsihappegaasivood kahe aasta peale toimusid kaasikus 2 juulis (212,9 mg C m⁻² h⁻¹) ja augustis (310,0 mg C m⁻² h⁻¹). Kõige väiksem oli voog kaasikus 2 veebruaris 5,1 mg C m⁻² h⁻¹.

Aastal 2014 oli kaasik 2 süsihappegaasi emissioon 113,1 mg C m⁻² h⁻¹ ja 2015 aastal oli keskmine emissioon väiksem 108,5 mg C m⁻² h⁻¹. Kõrgeimad keskmised emissiooninäidud kaasikust 2 oli 205,9 mg C m⁻² h⁻¹ juulis ja 219,8 mg C m⁻² h⁻¹ augustis 2014. a. ning samad kuud 2015. aastal olid kõrgemate tulemustega, vastavalt 336,5 mg C m⁻² h⁻¹ ja 283,6 mg C m⁻² h⁻¹. Madalaim emissioonid olid mõlemal uurimisperioodil veebruaris: 5,3 mg C m⁻² h⁻¹ 2015.a. ja 4,8 mg C m⁻² h⁻¹ 2016. a.

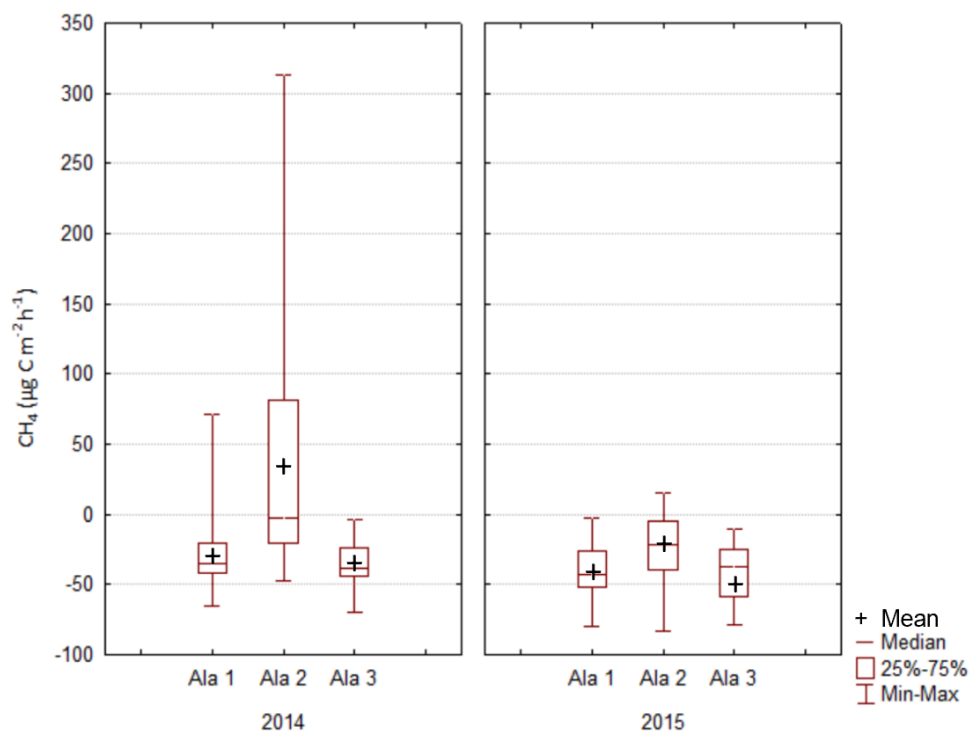
Kaasik 3 kahe aastane keskmine süsihappegaasi näit oli 96,4 mg C m⁻² h⁻¹ Kaasiku alal 3 oli CO₂ pidev emissioon, mis oli suurim suvel juulis (176,3 mg C m⁻² h⁻¹) ja augustis (244,7 mg C m⁻² h⁻¹). Talve lõpus veebruaris (7,6 mg C m⁻² h⁻¹) oli väikseim emissioon kaasikus 3, kuid võrreldes teiste kaasikutega oli see üpriski kõrge.

Aastal 2014 oli kaasikus 3 CO₂ keskmine emissioon 101,5 mg C m⁻² h⁻¹ ja 2015. aastal langes keskmine emissioon 91,9 mg C m⁻² h⁻¹. Andmete varieeruvus oli kõige väikesem kaasik 3. Esimesel mõõtmis aastal 2014 olid suurimad CO₂ emissioonid juulis (209,8 mg C m⁻² h⁻¹) ja augustis (236,3 mg C m⁻² h⁻¹). Järgmine aasta olid kuud nihkes võrreldes teiste alade tulemustega ehk suurim emissioon oli augustis (253,1 mg C m⁻² h⁻¹) ja septembris (191,4 mg C m⁻² h⁻¹). Väikseim emissioon esines 2015. aastal jaanuaris (6,8 mg C m⁻² h⁻¹). 2016. aastal oli kuu hiljem väikseim emissioon võrreldes eelmiste aastatega ehk veebruaris (4,6 mg C m⁻² h⁻¹) nagu oli esimesel alal.

Lisas 1 on joonisel 1 kajastatud süsihappegaasi kahe aastane käik, kus on näha sessoonne gaasivoogude varieeruvus.

3.1.2 Metaani voog kuivendatud kaasiku mullast

Kahe aasta keskmine metaani voog kaasikust 1 oli -35,3 µg C m⁻² h⁻¹ (Joonis 3). CH₄ sidumine oli suurim augustis (-56,0 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim veebruaris (-7,5 µg C m⁻² h⁻¹).



Joonis 3. Metaani emissioon ($\mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kaasiku uurimisaladelt 2014. ja 2015. aastal. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max väärtused.

Kaasikus 1 domineeris 2014. aastal peamiselt metaani sidumine ($-29,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Voo varieeruvus oli suur ja esines paaril korral ka CH_4 emissiooni. Suurim oli CH_4 sidumine 2014. aasta augustis ($-52,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Väikseks jäi sidumine juulis 2014. ja veebruaris 2015. aastal, olles vastavalt $-4,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja $-4,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. 2015. aastal oli kaasikus 1 CH_4 sidumine veel tugevam ($-41,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Suurim sidumine 2015. aastal toimus esimesel alal augustis ($-59,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim sidumine veebruaris ($-11,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Metaani keskmine emissioon oli kaasikus 2 ainukesena positiivne ($6,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige suurem emissioon kaasikus 2 oli juunis ($111,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Tähelepanu pakkus veel november, kus emissioon oli üllatavalt kõrge ($31,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Väikseim emissioon oli kahe aasta peale mais, olles $7,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Metaani sidumine oli suurim pärast suve lõppu sügisel septembris ($-30,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja nõrgem veebruaris ($-3,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Lisas 1 on välja toodud metaani aastane varieeruvus joonisel 2.

2014. aastal oli kaasiku alal 2 keskmine metaani emissioon $40,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Suurim metaaniemissioon toimus suvekuudel (näiteks juunis $243,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim oli emissioon mais ($25,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kaasikus 2 esines sidumist samuti 2014. aastal. Suurim oli

CH₄ sidumine detsembris (-36,1 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim aprillis (-3,6 µg C m⁻² h⁻¹). Kaasikus 2 toimus 2015. aastal tugev metaani sidumine, keskmiselt 40,9 µg C m⁻² h⁻¹. Anomaalia esines 2015. aastal aprillis, mis oli ainuke kuu, kus emiteerus CH₄ 88,2 µg C m⁻² h⁻¹. Suurim metaani sidumine 2015. aastal esines augustis (-58,4 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim sidumine oli 2016. aastal veebruaris (-2,2 µg C m⁻² h⁻¹).

Kaasiku alal 3 toimus kahe aasta jooksul pidev metaani sidumine (-38,7 µg C m⁻² h⁻¹). CH₄ emissiooni ei olnud ja seetõttu varieerus CH₄ voog vähe. Suurim CH₄ sidumine toimus augustis keskmiselt -57,4 µg C m⁻² h⁻¹. Kaasikus 3 vähenes metaani sidumine veebruaris, olles -15,7 µg C m⁻² h⁻¹.

Metaani sidumine oli 2014 aastal kaasikus 1 ja 3 väga sarnane (-35,0 µg C m⁻² h⁻¹). Varieeruvus 2014. aastal metaani sidumisel oli väike ja järgimine aasta see kasvas. Suurim oli CH₄ sidumine augustis (-50,8 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim veebruaris (-15,5 µg C m⁻² h⁻¹). Ka 2015 a. oli metaani sidumine sarnane aladel kaasik 1 ja 3. 2015. a. metaani sidumine veelgi kasvas (-41,9 µg C m⁻² h⁻¹). Suurim metaani sidumine oli novembris (-54,3 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikesim veebruaris (-15,9 µg C m⁻² h⁻¹).

Kolme kaasiku keskmiselt seoti metaani -22,6 µg C m⁻² h⁻¹. Keskmine metaani voog varieerus laias ulatuses, jäädes vahemikku -83,0 µg C m⁻² h⁻¹ kuni 313,2 µg C m⁻² h⁻¹. Valdavalt mõõdeti uurimisaladel metaani sidumist (Joonis 3). Sidumine kolme ala kohta oli suurim septembris (-46,2 µg C m⁻² h⁻¹). Ülejäänud kuudel esines samuti sidumist, aga väiksemal määral. Kolmel kaasikul kokku oli kõige väiksem sidumine veebruaris (-8,7 µg C m⁻² h⁻¹).

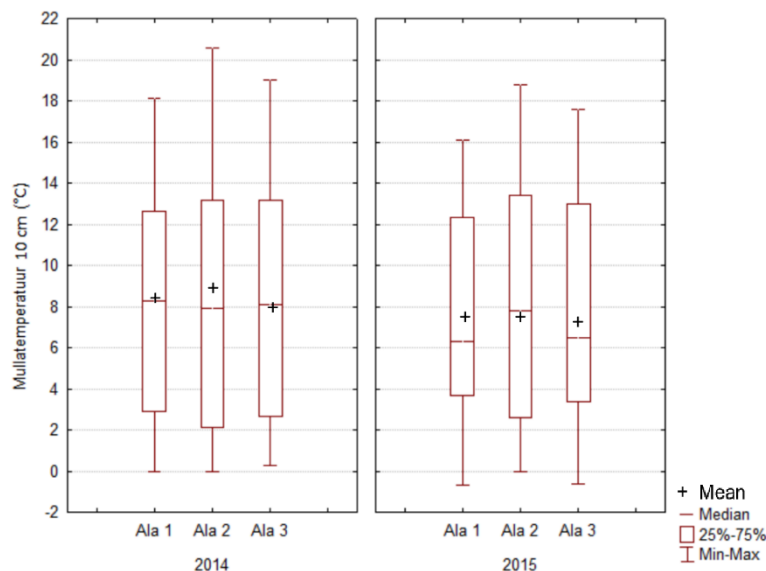
Aastal 2014 oli kolme kaasiku metaani sidumine keskmiselt -7,9 µg C m⁻² h⁻¹, kuid 2015. aastal see tõusis näit -35,7 µg C m⁻² h⁻¹. Metaani sidumine kasvas 4,5 korda. 2014. aastal oli kolme kaasiku metaani sidumine suurim septembrikuus (-33,1 µg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim sidumine augustikuus (-9,3 µg C m⁻² h⁻¹). Järgmisel aastal oli tugevaim CH₄ sidumine augustis (-60,7 µg C m⁻² h⁻¹) ja nõrgim veebruaris (-9,7 µg C m⁻² h⁻¹).

3.2. Keskkonnaparametrid uurimisaladel

3.2.1 Mullatemperatuur uurimisaladel

Kahel aastal ja kõikide kaasikute keskmine temperatuur 10 cm sügavusel oli 8,2°C. 2014. aastal oli kõikide kaasikute keskmine 8,7°C ja järgmisel aastal see langes 7,7°C peale (Joonis 4).

Mullatemperatuur 0–5 cm sügavusel oli keskmiselt 10,6 °C kõigil aladel kahel uurimisaastal. Mullatemperatuur 0–5 cm sügavusel oli väga varieeruv võrreldes teiste sügavustega. 2014. aastal kõikides kaasikutes oli mullatemperatuur kõrgem (10,9 °C) kui järgmine aasta (10,3 °C).



Joonis 4. Mullatemperatuur pindmises kihis (10cm) kolmel uurimisalal (Kaasik 1, Kaasik 2 ja Kaasik 3) 2014 ja 2015 aastal. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max väärtused.

Kaasikus 1 ja 2 ei erinenud mullatemperatuurid peaaegu üldse erinevate kihtide vahel. Mullatemperatuur 20 cm sügavusel ei erinenud kaasikute vahel ja erinevus oli suurim 0–5 cm sügavusel. Kaasiku 1 ja 3 vahel kehtis sama seos, et näitajad erinesid kõige rohkem 0–5 cm sügavusel. Erinevus puudus näitajate vahel 10 cm sügavusel kaasiku 1 ja 3 võrdluses (Joonis 4). Kaasikul 2 ja 3 erinevusi mullatemperatuuri puhul 10 cm–40 cm vahemikul esines vähe nagu kaasikus 1 ja 2.

Kõikides kaasikutes 10 cm ja 30 cm kihi vahel ei leitud temperatuuridel olulist erinevust. Mitte ühegi kaasiku 0–5 cm sügavuse mullatemperatuur ei kattunud teise kihi tulemustega. Kaasikus 2 olid väga sarnased 20 cm ja 40 cm mõõdetud mullatemperatuurid. Kaasikus 3 ja 1 10 cm ja 40 cm sügavusel näitudega mullakihi temperatuurid ei erinenud oluliselt omavahel.

Kaasikus 1 mullatemperatuur 10 cm sügavusel oli 8,0°C. Kõrgeim temperatuur mõõdeti kahe aasta kohta 10 cm sügavusel kaasikus 1 augustis, selleks oli 16,0°C. Kõige madalam temperatuur mõõdeti jaanuaris (0,5°C), kui pealmine maapind oli juba piisavalt jahtunud. Vaadates aastaid eraldi oli 2014. aastal keskmine mullatemperatuur 8,5°C ja 2015. aastal langes see 7,6°C peale.

Kaasikus 2 oli 10 cm sügavusel mõõdetud temperatuur endiselt kõige kõrgem võrreldes teiste kaasikutega (8,3°C). Kõrgeim oli temperatuur mullas augustis (18,4°C) ja väiksem veebruaris (0,3°C). 2014. aasta keskmine mullatemperatuur on võrdeline kaasikuga 1 10 cm sügavusel (8,9°C). Kuid 2015. aastal langes keskmine temperatuur poole võrra (7,7°C) madalamaks võrreldes eelmise aastaga.

Kaasikus 3 oli mullatemperatuur 10 cm sügavusel 7,6°C. Kõige soojem kuu oli nagu teistelgi kaasikutel august (17,4°C), külmim kuu aga jaanuar (1,2°C). 2014. aastal oli kaasikus 3 keskmine mullatemperatuur 10 cm sügavusel 8,0°C. 2015. aastal jäi mulla keskmine temperatuur sarnaseks kaasik 1 tulemusega (7,3°C).

Mullatemperatuur 20 cm sügavusel langes kõikides kaasikutes ja keskmiselt oli 8,0°C, mille näit ei muutunud 30 cm sügavusel. 2014. aastal oli kolme kaasiku peale keskmine temperatuur kõrgeim, olles 8,5°C ja see langes 8,4°C järgmises kihis. 2015. aastal samas kihis mõõdetud mullatemperatuur oli hoopis 3 ala peale kokku kõige madalam 7,5°C, kuid 30 cm sügavusel see hoopis tõusis (7,7°C).

Kaasikus 1 oli keskmine mullatemperatuur 20 cm sügavusel 7,6°C, mis peaaegu kattus järgmise sügavusega mullatemperatuuriga (30 cm 7,7°C). Kõige kõrgemad temperatuurid mõlemal esinesid augustis (15,0°C ja 13,5°C). Kaasik 1 kattus 20 cm madalama väärtusega kuu 10 cm kihi kuutulemusega, aga oli veidi kõrgem (1,2°C). 30 cm kihi madalaim näit arvulisest oli sarnane 20 cm sügavusel mõõdetud kihi omaga (2,4°C), aga see esines veebruaris. 2014. aastal oli 20 cm ja 30 cm sügavusel kaasik 1 temperatuur kõige madalam võrreldes teiste kaasikute temperatuuridega (8,0°C ja 7,9°C). 2015. aasta mullatemperatuur langes 20 cm sügavusel veelgi eelmise aasta omaga võrreldes (7,3°C). 30 cm sügavusel 2015. aasta mullatemperatuur oli kõrgem (7,5°C) võrreldes eelmise kihi tulemusega.

Kaasikus 2 oli keskmine mullatemperatuur kõige 20 cm sügavusel 8,1°C, mis oli samuti sarnane järgmise kihi tulemusega (8,2°C). Kõige kõrgeimad näitajad leiti endiselt augustis (17,4°C ja 16,5°C) ja madalaim oli näit veebruaris, mis kattus 30 cm kihi näitajate kuuga (1,0°C ja 1,3°C). 2014. aastal oli keskmine mullatemperatuur 20 cm ja 30 cm sügavusel kõrgem kaasik 1-st (8,7°C). 2015. aastal oli kõige madalaim keskmine temperatuur kaasikus 2 (7,6°C) võrreldes teiste kaasikutega, mis minimaalest tõusis järgmises kihis (7,8°C).

Kaasikus 3 on keskmine mullatemperatuuri näit kõige kõrgem võrreldes teiste kaasiku alade omaga sügavusel 20 cm (8,2°C) ja see jäi samaks 30 cm sügavusel. Kõrgeimad näidud jäävad eelmise kihiga samasse kuusse 20 cm ja 30cm sügavusel, aga on madalamad (16,2°C ja 15,1°C).

Madalaim näit on endiselt kahe aasta peale 20 cm sügavusel jaanuaris ($0,4^{\circ}\text{C}$), mis 30 cm sügavusel esines hoopis märtsis ($2,1^{\circ}\text{C}$). 2014. aastal oli mullatemperatuur kõige kõrgem 20 cm kihis kaasikus 3 ($8,9^{\circ}\text{C}$), mis oli veidi madalam 30 cm sügavusel ($8,7^{\circ}\text{C}$). 2015. aastal temperatuur langes, kuid oli kaasikus 3 20 cm sügavusel endiselt kõige kõrgem ($7,7^{\circ}\text{C}$) ja 30 cm sügavusel see tõusis veelgi ($7,9^{\circ}\text{C}$).

Tulemused, mis mõõdeti 40 cm olid kõige väiksema varieeruvusega, mille keskmine mullatemperatuur oli $7,9^{\circ}\text{C}$. Ühtlase käiguga mullatemperatuur kolmel alal 2014. aasta oli keskmiselt $8,4^{\circ}\text{C}$ ja sellest järgmine aasta $7,5^{\circ}\text{C}$.

Kaasikus 1 oli 40 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuur kõige madalama võrreldes teiste kaasiku aladega ($7,5^{\circ}\text{C}$). Kaasikus 1 kõige kõrgema mullatemperatuuriga kuu oli pidevalt august, kus 40 cm oli temperatuur $12,2^{\circ}\text{C}$. Madalaim temperatuur esines kaasikus 1 jaanuari kuus kahe aasta kohta ($2,4^{\circ}\text{C}$). 2014. aastal olid mullatemperatuurid endiselt kõige madalamad võrreldes teiste aladega ($7,8^{\circ}\text{C}$) ja 2015. aastal langesid need veel ($7,2^{\circ}\text{C}$).

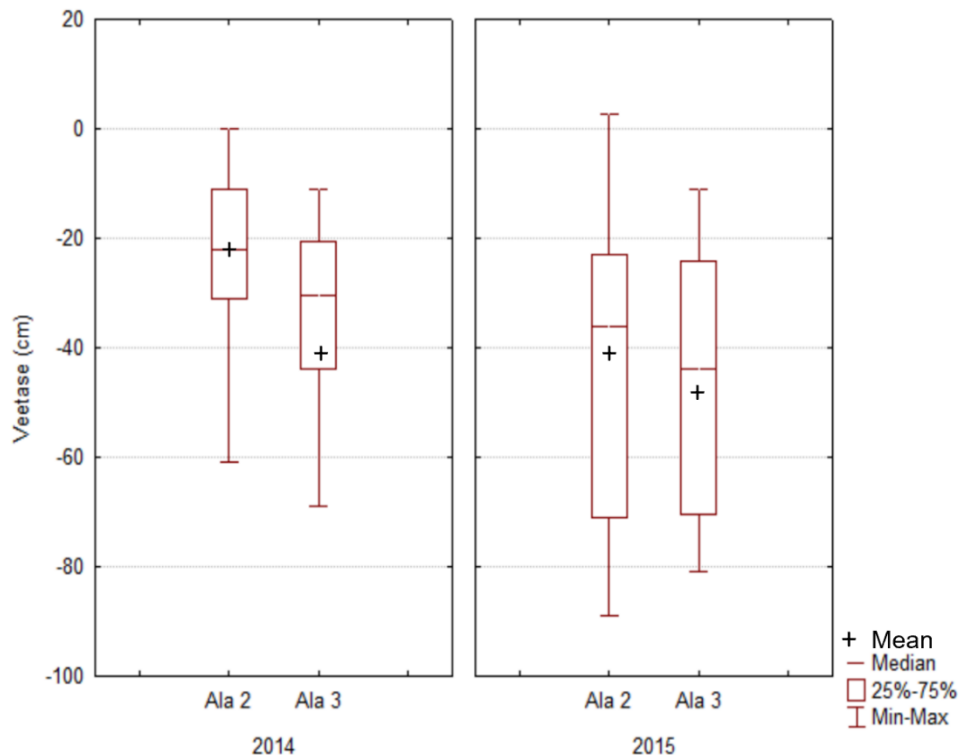
Kaasik 2 oli 40 cm sügavusel mullatemperatuur $8,1^{\circ}\text{C}$, kus kõige kõrgem temperatuur avaldus augustis ($15,9^{\circ}\text{C}$) ja madalaim jaanuaris ($0,3^{\circ}\text{C}$), mis oli kraadi poolest sama 30 cm sügavusel mõõdetud detsembri kuu tulemusega. 2014. aastal oli mullatemperatuur kõrgeim kaasikus 2 kõige sügavamal võrreldes teiste kaasikutega ($8,8^{\circ}\text{C}$). 2015. aastal langes keskmine mullatemperatuur ka kõige stabiilsemas kihis, olles $7,5^{\circ}\text{C}$.

Kaasik 3 sügavaim mõõdetud mullatemperatuur püsis sarnane kahe eelmise kihiga ($8,1^{\circ}\text{C}$). Kaasiku kõrgeima kuu ehk augusti mullatemperatuur 40 cm sügavusel ületas kaasik 1 temperatuuri ($14,3^{\circ}\text{C}$). Kõike jahedam kuu ja temperatuur kattus 10 cm kõrgema kihiga ($1,4^{\circ}\text{C}$). 2014. aasta keskmine mullatemperatuur oli $8,7^{\circ}\text{C}$, mis oli kaasik 3 kõrgema kihiga sarnane. 2015. aasta keskmine 40 cm sügavuse mullatemperatuur ühtis samuti 30 cm mõõdetud temperatuuri tulemusega ($7,6^{\circ}\text{C}$).

3.2.2 Veetase uurimisaladel

Kaasikus 1 jäi veetase alati maapinna sügavustesse varieerudes vahemikus täiesti kuivast kuni - 23 cm-ni maapinnast. Keskmist veetaset kaasikus 1 ei saanud arvutada, sest enamasti oli veetase sügavamal kui turbakihi paksus (43 cm). Kaasikus 1 kõige kuivem periood oli suvi, siis ei olnud vett piesomeetrites. Veetaseme puudumise tõttu ei leitud olulisi seoseid teiste kaasikutega ehk

erines täielikult teistest kaasikutest. 2014. aasta oli veetase väga madal kaasikus 1, mida kohati ei suudetud mõõta ja mõõdetud tulemuste keskmine varieerus 35 cm sügavusel. 2015. aastal oli keskmine veetase samuti madal, keskmiselt -41,1 cm, kui jäeti välja puuduolevad andmed, kui veetaset ei saanud mõõta piesomeetrist.



Joonis 5. Veetase (cm) kahel uurimisalal (Kaasik 2 ja Kaasik 3) aastatel 2014 ja 2015. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max väärtused.

Kaaskus 2 on veetaseme varieeruvus väga erinev ulatudes -89 cm sügavuselt kuni 2,7 cm maapinnast ülesse poole. Keskmiselt varieerub veetase 34,3 cm sügavusel pinnases ja kuivi päevi peaaegu puudus. Kõige madalam on veetase suvel, peamiselt augustis (-60,3 cm sügavusel) ja kõrgeim veetase esineb kevade algusel aprillis, kus veetase on 12,7cm sügavusel. Kaasikus 2 oli veetase palju kõrgem 2014. aastal, kus keskmine veetase oli kaasikus 2 -22,9 cm ehk kõige kõrgem. 2015. aastal varieerus veetase veel rohkem kui eelmisel aastal, mille näidu jäid keskmiselt 41,0 cm sügavusele.

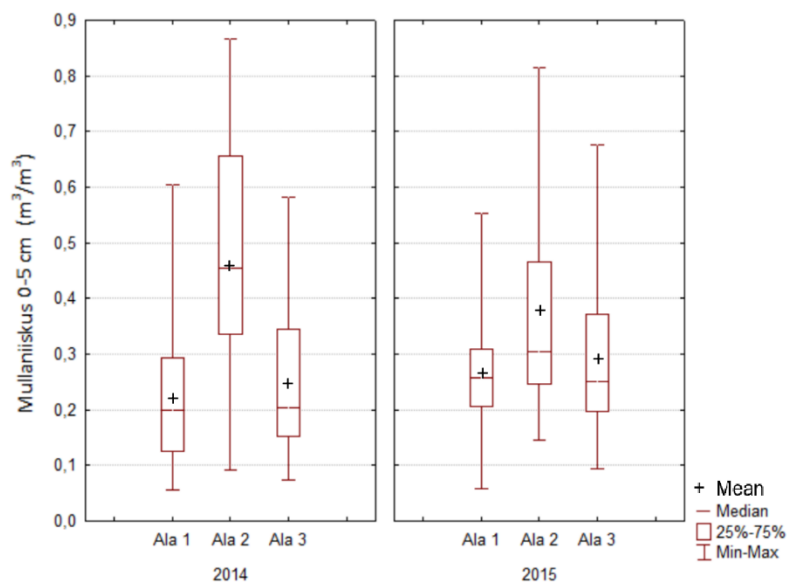
Kaasikus 3 oli veetase samuti sügaval maapinnas keskmiselt varieerus -41,6 cm. Kolmandas kaasikus oli veetase kõige madalam augustis (-72,4 cm) ja kõige kõrgem märtsis (-15,0 cm). Keskmine veetase oli kaasikus kolm 2014. aastal -33,0 cm. Veetasemevahemik 2015. aastal suurenes ja keskmine tase jäi 2015. aastal kolmandas kaasikus -48,5cm sügavusele.

Veetase varieerub alade vahel väga erinevalt. Kaasik 2 ja 3 veetasemed erinesid oluliselt kahe aasta peale kokku. Vaadates 2015. aastat erinevus vähenes mõlema kaasiku vahel, mida saame näha joonisel 5. Kolme alapeale kokku jäi keskmine veetase -38,0 cm sügavusele, kui mitte arvestada kuiva perioode. Kolme ala kohta oli veetase kõige madalam septembris kaasikus 2 sügavusel 89 cm. Kõige kõrgem oli veetase 2 kaasikus, kattes maapinna 2,7 cm veekihi alla (Joonis 5).

3.2.3 Mullaniiskus uurimisaladel

Kahe aasta keskmiselt oli kaasik 2 märjem kui kaasik 1 ja kaasik 3, mis omavahel ei erinenud (Joonis 6).

Kaasikus 1 oli keskmine mullaniiskus 0-5cm sügavusel kogu uurimisperioodil $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Kõige suurem oli mullaniiskus kaasikus 1 mais ($0,34 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm) ja väikseim augustis ($0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 2014. aasta mullaniiskus oli kahe aasta keskmisest madalam ($0,23 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 2015. aasta keskmine niiskus tase oli kõrgem kahe aasta keskmisest ($0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm).

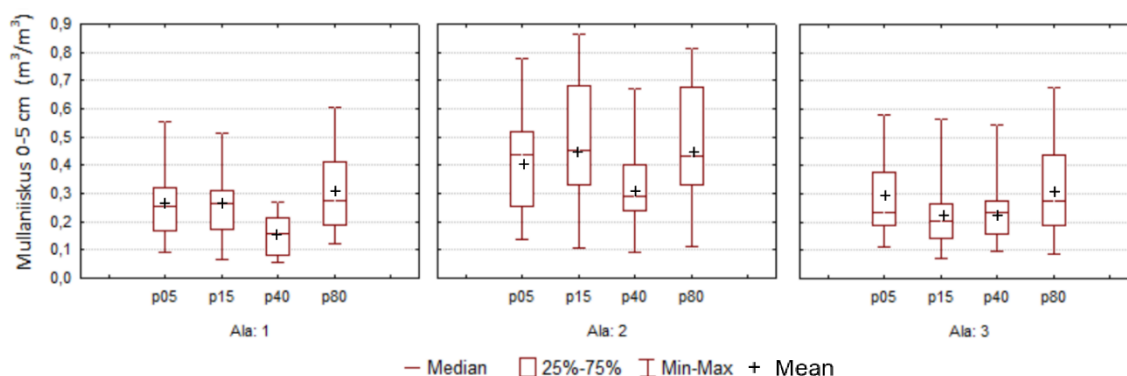


Joonis 6. Mullaniiskus (m^3/m^3) 0-5 cm sügavusel maapinnas kolmel uurimisalal (Kaasik 1, Kaasik 2 ja Kaasik 3) aastatel 2014 ja 2015. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max vahemik miinimumist kuni maksimumini.

Kaasik 1 ja kaasik 2 mullaniiskuse erinesid. Kaasikute 1 ja 3 vahe esines kõige tugevam sarnasus niiskuse vahel. Kaasik 2 ja 3 niiskus andmed erinesid kahe aasta peale kõige rohkem.

Kaasikus 2 oli mullaniiskus kõige kõrgem võrreldes teiste kaasiku aladega ($0,42 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). Kõige kõrgem mullaniiskuse näit esines kahe aasta kohta aprillis ($0,58 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). Niiskus mullas oli madalaim talve keskel veebruaris ($0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 2014. aastal oli kõige kõrgem mullaniiskus võrreldes aastati ja alade vahel ($0,47 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). Samuti oli 2015. aastal kõrge mullaniiskus alal 2 ($0,38 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm) võrreldes teiste aladega. Uuritavatest aladest oli mullaniiskus 0–5 cm sügavusel kõige kõrgem kaasikus 2 (Joonis 6).

Kaasikus 3 oli mullaniiskuse tase $0,27 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm. Kõige kõrgem mullaniiskusega kuu oli mai kaasikus 3 ($0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm) ja madalamad näitajad esinesid augusti ja septembri kuus ($0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 2014. aastal oli mullaniiskus madalam ($0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm) nagu kaasikus 1. Nagu alal 1 tõusis ka kaasikus 3 mulla niiskuse tase 2015. aastal ($0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm).



Joonis 7. Mullaniiskuse ja kauguse kuivenduskraavist (p05 - 5m; p15-15m; p40-40 m; p80-80 m) omavahelisest mõjust kolmel erineval kaasikul (Kaasik 1, Kaasik 2 ja Kaasik 3). Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max vahemik miinimumist kuni maksimumini.

Kaasikus 1 oli 5 ja 15 m kaugusel kraavist mullaniiskus väga sarnane ($0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm) ja see langes 40m kaugusel ($0,16 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 80m mullaniiskus oli kõige suuremas vahemikus, mis oli ka kõige kõrgem kaasikus 1 ($0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm).

Kaasikus 2 oli kõige kõrgem mullaniiskus kõikidest kaasikutest ($0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 5 m kaugusel mõõdetud punkt varieerus vähem kui 15m kaugusel punkt (keskmine $0,48 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). 15 m ja 40 m kaugusel punkt olid suurima mullaniiskusega. 40 m kaugusel nagu kaasikus 1 oli väikseim mullaniiskus kaasikus 2 ($0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm).

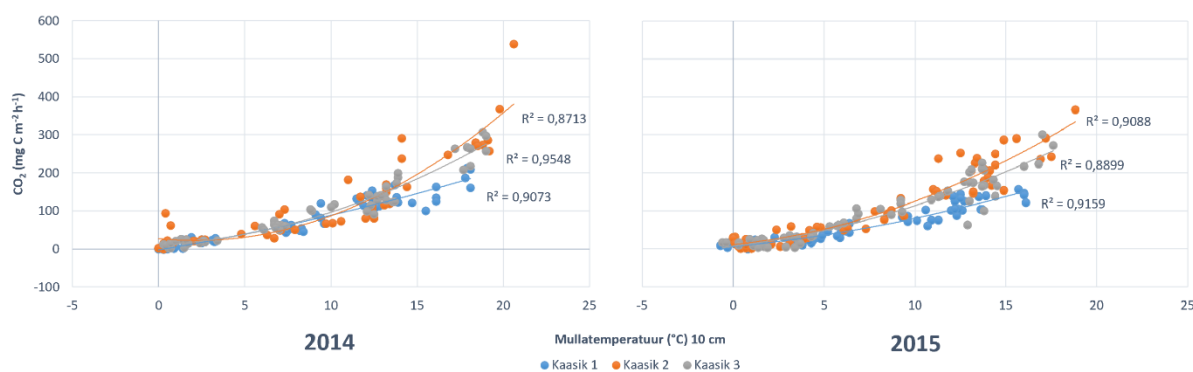
Keskmised mullaniiskuse tulemused jäid kaasikusse 3. Kraavis 5 m ja 40 m kaugusel olid näidud suurimad ja sarnasemad ($0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm ja $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm). Kaasikus 3 olid 15 m ja 40 m kaugusel kraavist näidud kõige madalamad ja samuti kahe teise kaasiku vahel ($0,23 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm ja $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 0–5 cm).

Kaasik 1 ja 3 ei erine niiskuse muutumise järgi oluliselt. Kõige suurem erinevus on punktis 40 m kaugusel, kus mõlemas toimub mulla niiskuse alanemine, aga kaasikus 1 on see suurim. Kaasik 2 erineb oma kõrgemate andmete poolest. Erinevused vähenesid 80 m kaugusel kraavist kõikide kaasikute suhtes, mida näeb jooniselt 7.

3.3. Süsihappegaasivoogude seos keskkonnaparameetritega

3.3.1 CO₂ voo seos mullatemperatuuriga

Süsihappegaasi emissioon korreleerus kaasikutes viiel erineval sügavusel mõõdetud mullatemperatuuridega (0–5, 10, 20, 30 ja 40 cm) mõlemal aastal. Mullatemperatuuri ja CO₂ emissiooni ja 10 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuriga oli tugevaim seos ($R^2 = 0,91$) kõigil uurimisaladel (Joonis 8).



Joonis 8. CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissiooni seos 10-cm sügavuselt mõõdetud mullatemperatuuriga kaasiku uurimisaladel 2014. ja 2015. aastal.

Spearmani korrelatsioonianalüüsi järgi oli kõige nõrgem seos CO₂ voo ja mullatemperatuuri vahel uuritavates kaasikutes 40 cm sügavusel ($\rho = 0,88$).

CO₂ emissiooni ja 10 cm sügavuselt mõõdetud mullatemperatuuri vaheline positiivne seos oli tugevam kaasikus 1 ($\rho = 0,95$). Nõrgim seos oli 0–5 cm sügavusel ($\rho = 0,80$).

Kaasikus 1 oli 2014. aastal suurim korrelatsioon mullatemperatuuri ja süsihappegaasi emissiooni vahel 10 cm sügavusel ($R^2=0,91$) ning nõrgem oli 0–5 cm sügavusel ($\rho=0,83$). 2015. aasta oli CO₂ ja mullatemperatuuri vaheline seos kõvasti tugevam, keskmiselt $\rho=0,91$. Kõige tugevam oli seos 20 cm sügavusel ($\rho=0,96$) ja nõrgim samuti 0–5 cm sügavusel ($\rho=0,73$).

Kõige väiksemad, kuid tugevad ja olulised seosed tulid välja kaasikus 2 ($\rho=0,89$). Kaasikus 2 oli 30 cm juures tugev korrelatsioon ($\rho=0,92$) mullatemperatuuri ja süsihappegaasi vahel. Seos leiti 20 cm sügavuselt ($\rho=0,88$).

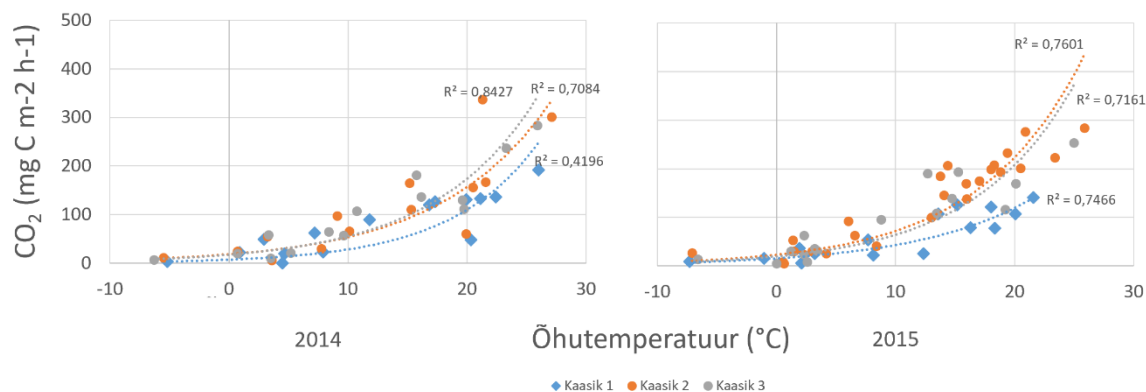
Kaasikus 2 oli keskmine korrelatsioon erinevates kihtides 2014. aastal ($\rho=0,89$). Kõige tugevam korrelatsioon esines 30 cm sügavusel mõõdetud CO₂ emissiooni ja mullatemperatuuri omavaheliselt mõjust ($\rho=0,91$) ja nõrgim oli seos 20 cm sügavusel ($\rho=0,87$). 2015 aastal kaasikus 2 oli keskmine korrelatsioon kõikide kihtide peale kokku ($\rho=0,88$), mis ei näita väga suurt muutust. 2015. aastal oli süsihappegaasi ja mullatemperatuuri vaheline korrelatsioon tugevaim 30 cm sügavusel ($\rho=0,91$) ja tugev, kuid viie sügavuse puhul nõrgim seos oli 20 cm sügavusel ($\rho=0,86$).

Kaasikus 3 oli tugevaim seos 10 cm sügavusel ($R^2=0,95$) mullatemperatuuri ja süsihappegaasi emissiooni vahel. See tähendab, et kaasikus kolm kirjeldas 10 cm sügavuselt mõõdetud mullatemperatuur 95% mullahingamise hajuvusest. Sarnane tulemus oli ka 0–5 cm ning 20 cm sügavuse kohta. Nõrgim korrelatsioon kaasikus 3 esines 40 cm sügavusel ($\rho=0,91$).

Kaasikus 3 oli 2014. aastal korrelatsioon mullatemperatuuri ja süsihappegaasi vahel ($\rho=0,93$). Kaasik 3 alal esines tugevaim korrelatsioon viiest sügavusest 10 cm ($\rho=0,97$) ja nõrgem oli seos 2014. aastal 40 cm sügavusel ($\rho=0,88$). Korrelatsioon nõrgenes mullatemperatuuride ja CO₂ vahel 2015. aastal ($\rho=0,92$). Kõige tugevam korrelatsiooni ($\rho=0,94$) oli 20 cm sügavusel mullakihi.

3.3.2 CO₂ voo seos õhutemperatuuriga

Kõigil uurimisaladel oli mõlemal aastal statistiliselt oluline ($p<0,005$) eksponentsiaalne seos õhutemperatuuriga (Joonis 9).



Joonis 9. CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide seos temperatuuriga kaasiku uurimisaladel 2014. ja 2015. aastal.

Kaasikus 1 oli keskmine kahe aasta õhutemperatuur 11,0°C. Kahel aastal kaasikus 1 on tugev seos süsihappegaasi emissiooni ja temperatuuri vahel ($\rho=0,86$). Kaasikus 1 oli 2014. aastal keskmine temperatuur 11,9°C ning seos temperatuuri ja CO₂ voo vahel oli $\rho=0,84$. Keskmine temperatuur 2015. aastal oli 9,8°C kui eelneval ning ka seose tugevus langes ($\rho=0,82$).

Kaasikus 2 keskmine õhutemperatuur oli 11,9°C. Kaasikus 2 on suurim seos süsihappegaasi ja temperatuuri vahel ($\rho=0,89$). Kaasikus 2 oli 2014. aastal keskmine temperatuur 11,6°C, mis oli kõige kõrgem. Seos oli tugevam gaasi ja temperatuuri vahel ($\rho=0,90$). Kaasikus 2 kasvas 2015. aastal keskmine temperatuur veelgi (12,9°C) võrreldes kaasikuga 1. Keskmise temperatuuri tõusuga langes seose tugevus gaasivoo suhtes ($\rho=0,83$).

Kaasikus 3 oli väikseim temperatuur kahe aasta peale kokku (9,8°C). Kaasiku 3 on sama suur positiivne seos CO₂ emissiooni ja temperatuuri vahel ($\rho=0,89$) nagu kaasikus 2. $R^2=0,78$ mis on teiste kaasikutega võrreldes kõige tugevam. Kaasikus 3 oli 2014. aastal endiselt kõikidest kaasikutest madalaim keskmine temperatuur (10,6°C). Kuid seos oli tugevaim sellel aastal kaasikus 3 CO₂ emissiooni ja temperatuuri vahel ($\rho=0,90$). 2015. aasta keskmine temperatuur oli madalaim kaasikus 3 (9,0°C), kus esines kõige suurem seos gaasi ja temperatuuri vahel ($\rho=0,88$).

3.3.3 CO₂ voo seos veetasemega

Kuival perioodil ehk kui veetase oli madal muutus CO₂ emissioon kõige suuremaks kaasikus 1. Kõige kõrgem oli veetase aprillis, millal veetase oli 23 cm sügavusel maapinnast, kuid

süsihappegaasi emissioon püsis väiksena. Süsihappegaasi ja veetaseme vahel oli oluline negatiivne nõrk seos ($\rho=-0,22$), see oli nõrgim erinevate kaasikute vahel. Kaasikus 1 leiti oluline seos 2014. aasta veetaseme ja CO₂ emissiooni vahel ($\rho=-0,28$). Süsihappegaasi ja veetaseme vahel ei leitud aastal 2015 olulist seost kaasikus 1.

Teise alal, kus oli keskmine veetase -34,3 cm sügavusel, oli keskmise tugevusega seos süsihappegaasi ja veetaseme vahel ($\rho=-0,53$). Kuiv periood suvel ja sügisel soodustas süsihappegaasi emissiooni kaasikus 2. Kaasikus 2 esines 2014. aastal oluline seos süsihappegaasi ja veetaseme vahel ($\rho=-0,39$). Sarnaselt eelmise aastaga esines oluline seos veetaseme ja CO₂ vahel ($\rho=-0,67$), kuid seos oli poole võrra tugevam.

Kaasikus 3 oli veetase madalam kui kaasikus 2. Kahe aasta peale esines süsihappegaasi ja veetaseme vahel negatiivne korrelatsioon kaasikus 3 ($\rho=-0,62$), mis oli kõige tugevam kõikidest kaasikutest. 2014. aastal oli seos süsihappegaasi emissiooni ja veetaseme muutuste vahel kolmandas kaasikus $\rho=-0,55$. Kolmanda ala kaasikus esines 2015. aastal suurim ja olulisem seos süsihappegaasi ja veetaseme vahel ($\rho=-0,86$).

Alade veetase oli väga varieeruv ja sellega varieerus ka seoste tugevus. Nende alade vahel esines oluline negatiivne seos süsihappegaasi emissiooni ja veetaseme vahel ($\rho=-0,43$).

3.3.4 CO₂ voo seos mullaniiskusega

Kaasikus 1 oli mullaniiskus 0–5 cm sügavusel mullas keskmiselt 0,24 m³/m³ ning oli negatiivne seos CO₂ emissiooni ja niiskuse vahel ($\rho=-0,25$). Kaasikus oli 2014. aastal keskmine mullaniiskus 0,23 m³/m³ 0–5 cm ning olulist seost süsihappegaasi ja mullaniiskuse vahel ei leitud. 2015. aastal kaasikus 1 esines oluline seos süsihappegaasi ja mullaniiskuse vahel ($\rho=-0,41$). Keskmine mullaniiskus oli 2015. aastal 0,26 m³/m³.

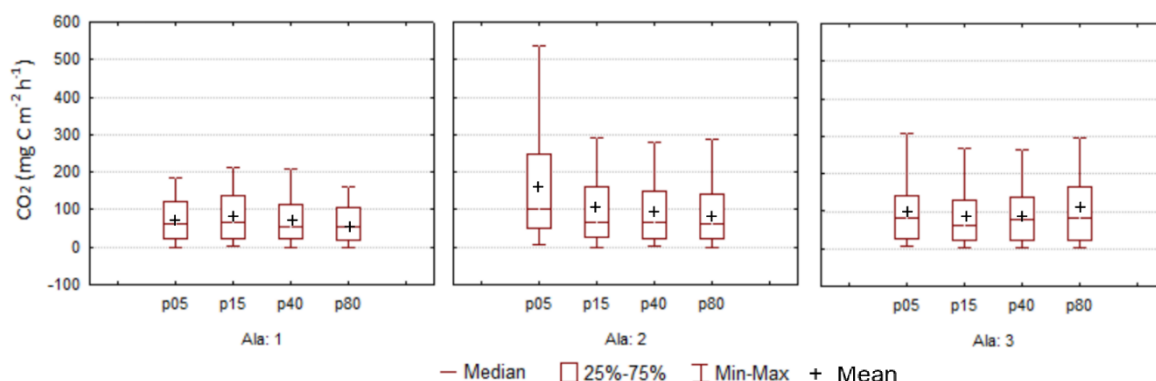
Kaasikus 2 oli keskmine mullaniiskus 0,42 m³/m³. Kaasikus 2 ei leitud mullaniiskusele seost süsihappegaasi emissiooniga. 2014. aastal kaasikus 2 oli mullaniiskus suurim võrreldes teiste aladega (0,47 m³/m³). 2015. aastal oli keskmine mullaniiskus 0,38 m³/m³. Mõlemal aastal ei tulnud välja olulist seost mullaniiskuse ja CO₂ vahel.

Kaasikus 3 oli kahe aasta keskmine mullaniiskus 0,27 m³/m³. CO₂ emissiooni ja mullaniiskuse vahel oli kõige tugevam seos võrreldes teiste kaasiku aladega ($\rho=-0,29$). Kaasikus 3 oli 2014.

aastal keskmine mullaniiskus $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ja sellel aastal ei leitud olulist seost kahe näitaja vahel. Järgmine aasta korreleerusid omavahel tugevalt CO_2 ja mullaniiskus ($\rho=-0,60$), siis oli ka mullaniiskuse kõrgem ($0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

3.3.5 CO_2 voo seos kuivenduskraavi kaugusega

Näidud 15 m kraavi kaugusest ja CO_2 emissiooni vahel ei erinenud kaasiku 1 ja 3 vahel. Erinevus nende kaasikute vahel oli suurim 80 m kaugusel kraavist. Kaasikus 2 ja 3 ei leitud olulist erinevust CO_2 emissioonidel 40 m kaugusel kraavist ja samuti 15 m kaugusel kraavist. Kõige erinevad tulemused olid 0–5 m kaugusel kraavist võrreldes kaasik 2 ja teise kahe alaga (Joonis 10). Üldiselt võib väita, et kraavist kaugemale liikudes CO_2 vood oluliselt ei muutu.



Joonis 10. CO_2 ($\text{mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) emissioon erinevatel kaugustel kuivenduskraavist (p05 - 5 m; p15 - 15m; p40 - 40 m; p80 -80 m) kolmel uurimisalal (Kaasik 1, Kaasik 2 ja Kaasik 3) uurimisperioodil aprillist 2014 kuni märtsini 2016. Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25%-75% kvartiilide piirid ja min-max väärtused.

Kaasikus 1 lähim mõõtmispunkt, mis asus viie meetri kaugusel, mõõtis kokku keskmiselt $71,9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige suurem on viie meetri kaugusel süsihappegaasi emissioon augusti kuus ($145,4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige nõrgem on see kahe aasta peale veebruari kuus ($6,4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal oli emissioon suurem ($76,0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kui 2015. aastal ($67,8 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kaasikus 1 viie meetri kaugusel kraavist. 2015. aastal esines veebruaris ainukesena süsihappegaasi sidumine viie meetri kaugusel kraavist ($-0,2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kaasikus 2 kraavile kõige lähemal mõõdetud süsihappegaasi emissioon oli suurim kõikidest kaasikutest ($158,9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Gaasi varieerumis vahemik oli väga suur võrreldes teiste

kaasikute ja punktidega (Joonis 10). Kõige suurem CO₂ emissioon viie meetri kaugusel kraavist oli augustis (452,1 mg C m⁻² h⁻¹) ja väikesem emissioon esines veebruaris (11,6 mg C m⁻² h⁻¹). 2014. aastal oli emissioon suurem (174,0 mg C m⁻² h⁻¹) kaasikus 2 kui 2015. aastal (145,6 mg C m⁻² h⁻¹).

Kaasikus 3 oli kraavile lähim mõõtmis punkt (5 m) suurima keskmise emissiooniga (104,3 mg C m⁻² h⁻¹). Kuude võrdluses oli kaasikus 3 viie meetri kaugusel suurima emissiooniga august (258,7 mg C m⁻² h⁻¹) ja nagu eelmistes kaasikutes oli kõige väiksem emissioon veebruaris (10,0 mg C m⁻² h⁻¹). Eelmistele kaasikutele sarnaselt oli kaasikus kolm suurim süsihappegaasi emissioon 2014. aastal (104,9 mg C m⁻² h⁻¹) ja nõrgem 2015. aastal. (103,8 mg C m⁻² h⁻¹).

15 meetri kaugusel kraavist mõõdetud punktis oli kaasikus 1 süsihappegaasi emissioon kahe aasta peale 80,8 mg C m⁻² h⁻¹, mis oli kõige madalam võrreldes teiste kaasikutega. Varieeruvus CO₂ lendumisel oli 15 meetri kaugusel suurim kaasikus 1. Kõige suurem emissioon oli 15 meetri kaugusel kaasikus 1 suvel juulis (156,6 mg C m⁻² h⁻¹) ja kõige tagasihoidlikum oli veebruari kuu (6,3 mg C m⁻² h⁻¹). Aastal 2014 oli CO₂ emissioon kõrge kaasikus 1 (84,6 mg C m⁻² h⁻¹) ja järgmine aasta langes see oluliselt (72,5 mg C m⁻² h⁻¹).

Kaasikus 2 kraavist 15 meetri kaugusel oli keskmine süsihappegaasi emissioon 105,0 mg C m⁻² h⁻¹. Suurim CO₂ emissioon ilmnas suvel augustis (452,1 mg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim märtsis (15,8 mg C m⁻² h⁻¹), samuti esines veebruaris väike sidumine (-0,4 mg C m⁻² h⁻¹). Võrreldes teiste kaugustega oli 2014. aastal kaasikus 2 süsihappegaasi emissioon üpriski madal (99,5 mg C m⁻² h⁻¹) ja 2015. aastal tõusis see kaasikus 2 esinevatel kaugustel mõõdetud tulemustest (109,8 mg C m⁻² h⁻¹).

Kraavist 15 meetri kaugusel kaasikus 3 oli süsihappegaasi emissioon madal (89,2 mg C m⁻² h⁻¹). Kõige kõrgem oli emissioon kaasikus 3 augustist (240,5 mg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim veebruaris (7,6 mg C m⁻² h⁻¹) 15 meetri kaugusel. Süsihappegaasi emissioon oli 2014. aastal suurem kaasikus 3 kui kaasikus 1 (102,0 mg C m⁻² h⁻¹) ja 2015. aastal see langes (78,1 mg C m⁻² h⁻¹).

Kaasikus 1 süsihappegaasi emissioon vähenes 40 meetri kaugusel (65,8 mg C m⁻² h⁻¹). Kõige kõrgem oli emissioon endiselt sellel alal suvel juulis (161,4 mg C m⁻² h⁻¹) ja nõrgim esines talvel jaanuaris (4,0 mg C m⁻² h⁻¹). Kaasikus 1 toimus kahe aasta peale veebruaris 40 m kaugusel kraavist süsihappegaasi sidumine (-1,0 mg C m⁻² h⁻¹), millest suurem osa seoti 2015. aastal. Süsihappegaasi emissioon oli 2014. aastal kõrge ka 40 meetri kaugusel kraavist (74,6 mg C m⁻² h⁻¹). 2015. aastal emissiooni tase langes (57,0 mg C m⁻² h⁻¹).

40 meetri kaugusel kraavist kaasikus 2 mõõdetud CO₂ tulemused olid madalamad (92,9 mg C m⁻² h⁻¹) võrreldes 15 meetri punkti tulemustega. Suurim oli emissioon endiselt suvel augusti kuus (253,4 mg C m⁻² h⁻¹) ja väikesim esines talvel veebruaris (7,0 mg C m⁻² h⁻¹). 2014. aastal oli keskmine emissioon suurem 40 meetri kaugusel kaasikus 2 (94,7 mg C m⁻² h⁻¹) kui järgmine aasta. 2015. aastal emissioon vähenes 40 meetri kaugusel (91,3 mg C m⁻² h⁻¹) nii nagu kõikides kaasikutes.

Kaasikus 3 oli 40 meetri kaugusel keskmine süsihappegaasi emissioon 89,7 mg C m⁻² h⁻¹, mis oli kõrgem kui eelmises punktis ja kaasikus 1. CO₂ emissioon oli endiselt kõrgeim augustis (215,0 mg C m⁻² h⁻¹) ja madalaim veebruaris (2,9 mg C m⁻² h⁻¹) nii nagu oli 40 meetri kaugusel kaasikus 2. Kaasikus 3 oli 2014. aastal võrreldes teiste kaasikutega 40 meetri kaugusel suurim CO₂ emissioon (96,2 mg C m⁻² h⁻¹). Järgmine aasta langes süsihappegaasi tase ja ületas, vaid kaasik 1 40 meetri kaugusel mõõdetud koguse (83,9 mg C m⁻² h⁻¹).

80 meetri kaugusel kraavist kaasikus 1 on kõige nõrgem süsihappegaasi emissioon (62,8 mg C m⁻² h⁻¹). Kõige suurem emissioon toimus endiselt suvel juulis (118,3 mg C m⁻² h⁻¹) ja väikseim esines jaanuaris (2,0 mg C m⁻² h⁻¹). Sellest järgneval kuul toimus väiksem sidumine kaasikus 1 võrreldes 40 m kaugusel mõõdetud punktis sidumisega (-0,6 mg C m⁻² h⁻¹). Kaasikus 1 oli 2014. aastal 80 meetri kaugusel kraavist emissioon kõige väiksem (69,2 mg C m⁻² h⁻¹). 2015. aastal CO₂ emissioon jäi madalaks võrreldes eelmise aastaga (56,4 mg C m⁻² h⁻¹).

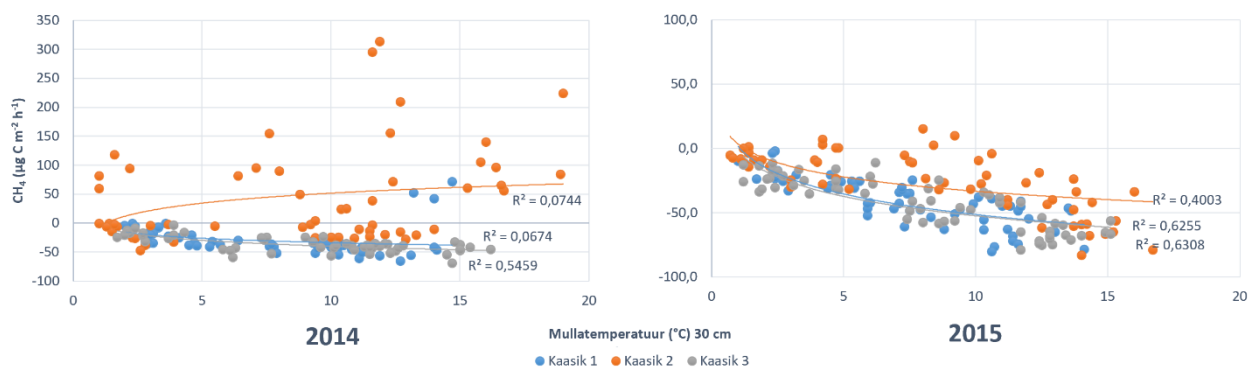
Kõige väiksem oli süsihappegaasi emissioon 80 meetri kaugusel kraavist kaasikus 2 85,7 mg C m⁻² h⁻¹. Suurim emissioon oli eelmise kaugusega samas kuus augustus (249,5 mg C m⁻² h⁻¹) ja veebruaris oli väikseim emissioon (2,0 mg C m⁻² h⁻¹). 2014. aastal oli CO₂ emissioon kõrge 80 meetri kaugusel kaasikus 2 (84,0 mg C m⁻² h⁻¹) võrreldes kaasiku 1 tulemusega. 2015. aastal tõusis emissioon kõige kaugemas punktis (87,2 mg C m⁻² h⁻¹).

Kaasik 3 80 meetri kaugusel mõõdetud punkt on eriline, sest sealne süsihappegaasi emissioon kahe aasta peale tõusis (112,6 mg C m⁻² h⁻¹), kui teistes kaasikutes langes see punkti kaugusega. Kõikide kaasikutega võrdluses oli 80 meetri kaugusel suurim emissioon augustis (102,4 mg C m⁻² h⁻¹). Väikseim emissioon oli kaasikus 3 jaanuaris (5,9 mg C m⁻² h⁻¹). Kaasikus 3 oli suurim CO₂ emissioon aastal 2014 (103,1 mg C m⁻² h⁻¹) ja see nõrgenes aastal 2015. (101,8 mg C m⁻² h⁻¹), kuid ületas teiste kaasikute emissioone 80 meetri kaugusel kraavist.

3.4 Metaanivoogude seos keskkonnaparametritega

3.4.1 CH₄ voo seos mullatemperatuuriga

Metaani sidumine korreleerus kolmes kaasikus viiel erineval sügavusel mõõdetud mullatemperatuuridega (10, 20, 30 ja 40 cm) kahel aastal. Tugevaim oli CH₄ sidumise ja temperatuuri vahel seos kaasikus 3 ($\rho=-0,76$). Kaasikus 2 esines ainukesena seos mulla temperatuuride ja süsihappegaasi emissiooni vahel 2014. aastal. Joonis 11 on näha, et kahe aasta peale oli metaani voo ja pindmise mullakihi temperatuuri vahel tugevaim seos kaasikus 1 ja 3.



Joonis 11. 30 cm sügavuselt mõõdetud mullatemperatuuri ja CH₄ emissiooni (mg C m⁻² h⁻¹) seos kaasikustes.

Kaasikus 1 esines negatiivne seos mullatemperatuuri ja metaani emissiooni vahel ($\rho = -0,60$). Tugevaim seos esines 30 cm sügavusel $\rho = -0,60$ ja nõrgim oli seos pindmises kihis ($\rho = -0,41$) mullatemperatuuride ja CH₄ vahel. Tugevaim seos esines 30 cm sügavusel 2014. aastal ($\rho = -0,53$) mullatemperatuuri ja metaani vahel ning nõrgim pindmises kihis 5 cm sügavusel ($\rho = -0,38$). 2014. aastal oli nõrk seos gaasi ja mullatemperatuuri vahel ($\rho = -0,47$) ning 2015. aastal muutus see tugevaks ($\rho = -0,73$). Tugevaim seos, mis oli stabiilne, aga negatiivne esines 30 cm sügavusel ($\rho = -0,81$) ja nõrgim seos 5 cm sügavusel ($\rho = -0,47$).

Kaasikus 2 ei leitud olulist seost kogu 2 –aastase mõõtmisperioodi peale. 30 cm kihi sügavusel oli oluline negatiivne seos temperatuuri ja metaani emissiooni vahel ($\rho = -0,18$). Aastal 2014 esines positiivne seos erinevate kihtide vahel ($\rho = 0,38$). Temperatuuri tõustes suurenes metaani emissiooni. Aastal 2015 esines tugev negatiivne seos mullatemperatuuride ja metaani emissiooni vahel ($\rho = -0,65$). Aastal 2014 oli tugevaim positiivne seos mullatemperatuuri ja metaani

emissiooni vahel 5 cm kihis ($p=0,42$) ja nõrgim, aga oluline oli see 20 cm sügavusel ($p=0,34$). Kahes viimases kihis ei leitud olulist seost 2014. aastal. Järgmisel aastal oli kihtides negatiivne seos ja tugevaim oli see 30 cm sügavusel ($p=-0,72$) ja nõrgim 5 cm sügavusel ($p=-0,56$). 2015. aastal esines kõikides kaasikutes negatiivsed seosed.

Kaasikus 3 esines tugevaim negatiivne seos mullatemperatuuri ja metaani emissiooni vahel ($p=-0,76$) kaheaastase perioodi kohta. Tugevaim oli negatiivne emissiooni seos 20 cm ja 30 cm sügavusel ($p=-0,77$) ja nõrgim kiht oli 5 cm sügavusel ($p=-0,73$), mis oli sarnane kaasik 1-ga. 2014. aastal oli kaasikus 3 negatiivne metaani emissiooni seos mullatemperatuuridega ($p=-0,66$). Kaasikus 3 esines kõige tugevam negatiivne seos 2014. aastal 10 cm sügavusel ($p=-0,67$) ja nõrgimad seosed jäid 5 cm ja 40 cm sügavusele ($p=-0,65$). 2015. aastal tugevnes seos mullatemperatuuri ja metaani vahel ($p=-0,85$), olles kõige tugevam seos kahe teise kaasiku vahel. Kõige tugevam korrelatsioon oli 40 cm sügavusel ($p=-0,85$) ja nõrgimaks jäi see pindmisel kihil 5 cm sügavusel ($p=-0,80$) nagu kõikidel kaasikutel.

3.4.2 CH₄ voo seos veetasemega

Kaasikus 1, kus veetase oli keskmiselt alla mõõdetavat taset, ei leitud kahe aasta peale seost metaani emissiooni ja veetaseme vahel. Aastal 2014 leiti oluline positiivne seos kaasikus 1 veetaseme ja metaani vahel ($p=0,26$). Vaadates 2015. aastat eraldi ei leitud gaasi ja veetaseme vahel olulist seost.

Kaasikus 2, kus veetase oli kõrgeim kahe aasta peale (-34,3cm) leiti keskmiselt oluline positiivne seos veetaseme ja CH₄ emissiooni vahel ($p=0,38$). 2014. aastal oli veetase kõrgem (-22,9cm sügavusel) ei leitud olulist seost gaasi ja veetaseme vahel. 2015. aastal veetase langes (-41,0 cm sügavusele), siis oli oluline positiivne gaasivoo ja veetaseme vahel ($p=0,66$).

Kaasikus 3 esines positiivne seos veetaseme (-41,6 cm sügavusel) ja metaani vahel ($p=0,76$). 2014. aastal oli kaasikus 3 veetase madalam kui kaasikus 2 (-33,0 cm sügavusel) ja metaani emissiooni seos veetasemega oli positiivne ($p=0,67$). 2015. aastal veetase langes veel sügavamale (-48,5 cm) ja positiivne seos tugevnes veelgi ($p=0,81$).

Kõigil aladel kogu mõõtmisperioodi kohta oli oluline positiivne seos ($p=0,1$) veetaseme ja metaani voo vahel.

3.4.3 CH₄ voo seos mullaniiskusega

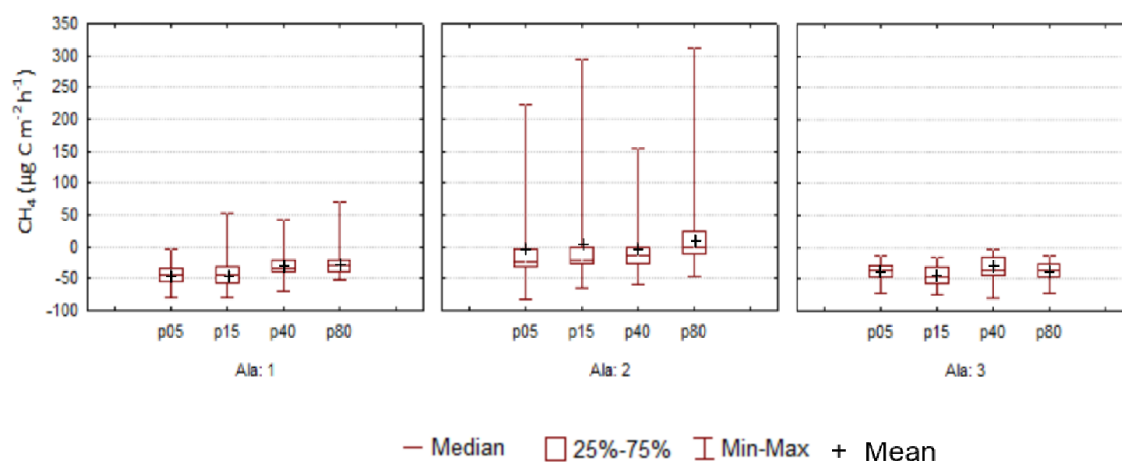
Kaasikus 1 ei leitud olulist seost mullaniiskuse ja metaani voo vahel. Vaadeldi eraldi kahte aastat ja leiti oluline seos mullaniiskuse ja gaasivoo vahel 2015. aastal ($\rho=0,38$).

Kaasikus 2 esines seos mullaniiskuse ja metaani emissiooni vahel positiivne seos ($\rho=0,26$). 2014. aastal ei leitud oluliste seost kaasik 2 mullaniiskuse ja metaani vahel. 2015. aastal oli positiivne seos gaasivoo ja mullaniiskuse vahel ($\rho=0,42$) ning siis oli ka mullaniiskus madalam.

Kaasikus 3 oli mullaniiskuse ja CH₄ voo vaheline seos $\rho=0,37$. Sarnaselt kaasikuga 1 ja 2, ei leitud 2014. aastal olulist seost mullaniiskuse ja metaani vahel. Kaasikus 3 oli ainukesena positiivne seos 2015. aastal mullaniiskuse ja metaani emissiooni vahel ($\rho=0,71$).

3.4.4 CH₄ voo seos kuivenduskraavi kaugusega

Uuritud kaasikute metaani emissiooni või sidumise vahel ei leitud erinevusi (Joonis 12). Kaasik 1 ja 3 ei erinenud oluliselt mõõdetud kaugustel kuivenduskraavist.



Joonis 12. CH₄ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide ja kaugus kraavist (p05 - 5 m; p15 – 15m; p40 – 40 m; p80 – 80 m) omavahelisest mõjust kolmel erineval kaasikul (Kaasik 1, Kaasik 2 ja Kaasik 3). Joonisel on näidatud: + keskmine; - mediaan; 25% -75% kvartiilide piirid ja min-max vahemik miinimumist kuni maksimumini.

Kaaskus 1 kuivenduskraavile kõige lähedamal mõõtmispunktis (5 m) oli suurim metaani sidumine $-43,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige suurem CH_4 sidumine toimus augustis ($-72,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja nõrgim oli veebruaris ($-12,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal oli metaani sidumine ($-38,4 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja 2015. aastal metaani sidumine suurenes võrreldes eelmise aastaga ($-49,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kaasikus 2 kraavist 5 meetri kaugusel oli enamasti metaani emissioon ($1,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), mis varieerus vahemikus -83 kuni $223,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige suurem metaani emissioon kraavi lähedal oli juunis ($84,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige väiksem augustis ($2,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 0,5 meetri kaugusel esines teisel alal metaani sidumist suurimal määral septembris ($-43,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim oli sidumine veebruaris ($-3,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kaasikus 2 oli kuivenduskraavi lähedal mõõtmispunktis 2014. aastal pidev emissioon ($44,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja 2015. aastal sidumine ($-36,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kaasikus 3 oli 5 meetri kaugusel kraavist metaani pidev sidumine $-38,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kraavi läheda oli suurim sidumine septembris ($-57,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja nõrgim veebruaris ($-15,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Aastal 2014 oli kraavi lähedal sidumine nõrgem ($-34,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kui 2015. aastal ($-42,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kaasikus 1 metaani sidumine nõrgenes 15 meetri kaugusel kahe aasta kohta ($-41,4 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige suurem oli metaani sidumine septembris ($-63,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja nõrgim sidumine jäi endiselt veebruarisse ($-11,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal oli metaani sidumine väiksem ($-33,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kui 2015. aastal ($-48,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), mis oli vastupidi teise kahe uuritud kaasikuga.

Kaasikus 2 kuivenduskraavist 15 meetri kaugusel mõõdetud metaaniemissioon oli $5,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige suurem oli emissioon kaasikus 2 juunis ($142,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim augustis ($15,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kraavist mitte eriti kaugel esines septembris tugev CH_4 sidumine ($-40,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal ($42,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja 2015. aastal ($-27,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) jäid metaani emissiooni ja sidumise näitajad sarnaseks 0,5 meetri kaugusel mõõdetud punkti omadega, kuid olid madalamate näitudega.

Kaasikus 3 kasvas CH_4 sidumine veelgi 15 meetri kaugusel kraavist ($-44,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõike tugevam oli metaani sidumine selles punktis augustis ($-68,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige nõrgem veebruaris ($-17,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kahe aastapeale kokku. Kaasikus 3 oli 15 meetri kaugusel kraavis 2014. aastal ($-44,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) sidumine, mis kasvas 2015. aastal ($-45,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

40 meetri kaugusel kaasikus 1 metaani sidumine oli veel suurem kui eelmistes punktides ($-29,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige suurem sidumine esines suvel augustis ($-47,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim

näitaja oli endiselt veebruaris ($-1,4 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) nagu kaasik 1 eelmiste kraavi kauguste puhul. 2014. aastal oli sidumine kaasikus 1 väiksem ($-24,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kui järgmine aasta ($-34,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kaasikus 2 40 meetri kaugusel kuivenduskraavist mõõdetud kahe aasta keskmine metaani emissioon oli $0,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige kõrgemaks tõusis emissioon juunis ($63,8 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja sellele järgnes kõige madalama näiduga kuu juuli ($6,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Tugev oli kaasikus 2 sidumine septembri kuus ($-36,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 40 meetri kaugusel kraavist. 40 meetri kaugusel kuivenduskraavist emiteerus metaani keskmiselt $25,4 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 2014. aastal ja sama väärtus 2015. aasta oli $-22,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Kaasikus 3 oli metaani sidumine $-33,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 40 meetri kaugusel kuivenduskraavist. Suurim metaani sidumine oli juulis ($-60,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väikseim jaanuaris ($-12,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal oli kõige suurem 40 m kaugusel mõõdetud CH_4 sidumine ($-29,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja 2015. aastal gaasi sidumine suurenes ($-37,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Keskmiselt oli metaani sidumine kaasikus 1 80 meetri kaugusel mõõtmispunktis $-26,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Suurim sidumine 80 meetri kaugusel kaasikus 1 oli septembris ($-45,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kaasikus 1 toimus 80 meetri kaugusel kraavist nõrgim metaani sidumine veebruaris ($-4,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. a. oli kõige väiksem sidumine $-21,1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ võrreldes teiste kaasikute 80 meetri kaugusel. 2015. aastal metaani sidumine tõusis ning oli $-31,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. See jäi madalaimaks võrreldes sama aasta teiste mõõtmispunktidega.

Kaasik 2 kõige kaugemas mõõtmispunktis (80 m) olid kahe aasta näitajad kõrgeimad metaani emissiooni $18,4 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige kõrgem oli metaani emissioon juunis ($154,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige madalaim oktoobris ($1,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kaasikus 2 kõige suurem sidumine esines detsembris ($-27,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 80 meetri kaugusel. 2014. aastal oli kõrgeim näit teises kaasikus 80 meetri kaugusel punktis ($51,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2015. aastal oli sidumine kaasikus 2 $-10,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Kaasikus 3 metaani sidumine 80 meetri kaugusel kuivenduskraavist oli suurem ($-37,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) võrreldes kraavile lähemate mõõtmispunktidega. Suurim oli sidumine augustis ($-56,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja väike sidumine oli veebruaris ($-17,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). 2014. aastal olid metaani sidumine ($-31,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 80 meetri kaugusel sarnane teiste mõõtmispunktidega. 2015. aastal tõusis sidumine veelgi ($-42,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

3.5. CO₂ ja CH₄ aastane voog

3.5.1 CO₂ aastane voog

CO₂ aastaste voogude arvutamiseks kasutati peatükis 3.3.2 leitud õhutemperatuuri ja CO₂ gaasi emissiooni vahelist seost. Summaarne aastane voog leiti kolmel uurimisalal mõlema uurimisperioodi kohta (aprill 2014-märts 2015 ja aprill 2015-märts 2016).

CO₂ aastane voog kõdusookaasikute mullast on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Süsihappegaasi aastane emissioon (g C m⁻² a⁻¹) kolmest kõdusoo kaasiku mullast.

Uurimisala\Aasta	CO ₂ (g C m ⁻² a ⁻¹)	
	2014	2015
Kaasik 1	355	394
Kaasik 2	562	685
Kaasik 3	602	621

Kaasikus 1 oli emissioon kõige väikseim mõlemal aastal (355 g C m⁻² a⁻¹ ja 394 g C m⁻² a⁻¹). Kaasikus 2 emissioon 2014. aastal oli madalam (562 g C m⁻² a⁻¹) kui 2015. aastal, mil oli kõrgeim süsihappegaasi lendumine (685 g C m⁻² a⁻¹) kolme uuritud kaasikuga võrreldes. Kaasikus 3 aastane voog oli kõige ühtlasem. 2014. aastal oli emissioon 602 g C m⁻² a⁻¹ ja 2015. aastal 621 g C m⁻² a⁻¹.

3.5.2. CH₄ aastane voog

Metaani voog arvutati kaalutud keskmisena eraldi kolmel uurimisalal mõlema uurimisperioodi kohta (aprill 2014-märts 2015 ja aprill 2015-märts 2016).

CH₄ aastane voog kõdusookaasikute mullast on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Metaani aastane voog (mg C m⁻² a⁻¹) kolmest uuritud kõdusoo kaasiku mullast.

Uurimisala\Aasta	CH ₄ (mg C m ⁻² a ⁻¹)	
	2014	2015
Kaasik 1	-271	-339
Kaasik 2	373	-195
Kaasik 3	-295	-351

Peamiselt toimus mõlemal aastal ja kõikides kaasikutes sidumine. Kaasikus 3 oli sidumine $-295 \text{ mg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 2014. a. ja $-351 \text{ mg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 2015. a. (Tabel 2). Kaasikus 1 olid samad numbrid vastavalt $-271 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja $-339 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kaasikus 2 olid tulemused erisuunalised. 2014. aastal toimus alal metaani emissioon $373 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja järgmine aasta oli sidumine samatugev $-195 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

4. Arutelu

Kaasik 1 oli kõige tugevamini kuivendatud ja veetase oli turbakihis ainult lühikese perioodi jooksul kevadeti. Kaasik 2 alal oli veetase kõige kõrgem ning vaheldus ka kõige rohkem. Kaasik 2 ala kõrvalt voolava Apna jõe paisutas kobras veetaseme ülesse ning maaomanikud lammutasid tammi. Kaasik 3 alal oli veetase pidevalt olemas ning varieerus uurimisperioodil kõige vähem.

4.1 CO₂ voog

Süsihappegaasi produtseeritakse aeroobses pinnases. Antud töös kasutatud CO₂ emissiooni moodustab nii maapealse madala taimestiku ja mullas olevate mikroorganismide hingamine. Peamine emissioon toimus märgala pindmisest kihist ja sügavuse suurenedes väheneb CO₂ emissioon, sest taimede juured (autotroofne hingamine) ja mikroobne biomass, seemed, mullafauna (heterotroofne hingamine) asetseb pindmises kihis. (Belger *et al.*, 2011)

Keskmine süsihappegaasi voog kolmes kaasikus varieerus vahemikus 0,33 mg C m⁻² h⁻¹ kuni 352,43 mg C m⁻² h⁻¹. Kaasikus 2 oli keskmine, suve ja kahe aasta CO₂ emissioonid kõrgeimaid võrreldes teiste aladega. Kaasikutes 2 ja 3 oli augustikuus emissioon kõige kõrgem. Keskmiselt lendus augustis kolmest kaasikust 230,2 mg C m⁻² h⁻¹. Väikseim oli emissioon kaasiku 1 alal ja kõigil uuritud aladel talvekuudel. Süsihappegaasi emissioon muutus sesoonselt.

2014. aastal alade vahel olulist erinevust ei esinenud süsihappegaasi emissioonil. Terve aasta oli kolmel kaasikul kõrgem emissioon kui järgmine aasta. 2014. aastal keskmine süsihappegaasi emissioon oli 95,6 mg C m⁻² h⁻¹ ja 2015. aastal langes see 88,0 mg C m⁻² h⁻¹ peale. 2015. aastal oli väike erinevus esimese ala ja ülejäänud kahe ala vahel. Jooniselt 2 on näha, et kõrgeim süsihappegaasi emissioon mõõdeti kaasikutes augustis 2014. aastal (kaasik 2: 538,6 mg C m⁻² h⁻¹).

Mitmed uuringud on tõestanud, et süsihappegaasi emissioon sõltub temperatuurist (Gutenberg *et al.*, 2019; Kaisel & Kohv, 2009; Tuittila *et al.*, 2004). Voogude intensiivsust mõjutab peale temperatuuri sesoonselt veel vegetatsiooni periood (Köster *et al.*, 2018, Maanso, 2015).

Käesoleva töö tulemused olid kirjandusest leituga kooskõlas. Süsihappegaasi emissioon korreleerus neljal sügavusel (10, 20, 30 ja 40 cm) mõõdetud mullatemperatuuriga, parim tugev seos leiti 10 cm sügavuse mullakihi temperatuuridega. Kõik emissioonid tõusid vegetatsiooniperioodi alguses aprillis ja saavutasid maksimumi suve keskel juulis ning augustis. Emissioonid olid väga väikesed alates detsembrist kõikides kaasikutes ja jäid terve talve vältel madalaks. Talve kuude väikesed emissioonid kaasiku uurimisaladelt oli seotud lumevaese ja sooja talvega, mis soodustas mikroobide aktiivsest tegevust mullas, mistõttu orgaaniline aine lagundati.

Mikroobide elutegevus oli soodustatud rohkem 2014. aastal kui mullatemperatuuri olid pidevalt kõrgemad kõigis neljas kihis. Püsiva sooja keskkonna olemasolu mullas suurendas CO₂ emissioone 2014. aastal võrreldes järgmise aasta emissioonide kogusega, mis olid veerandi võrra väiksemad. 2015. aasta pindmise ehk aktiivse kihi temperatuurid olid madalad, mistõttu ei esinenud suuri CO₂ heitekoguseid kuivendatud kaasikutelt. Kehtis tugev positiivne korrelatsioon temperatuuri tõusul mullas ja süsihappegaasi emissiooni vahel kõikides kihtides kõigil uuritud aladel. Kõige väiksemad mõjutused esinesid kihi 40 cm sügavusel, sest temperatuur polnud seal nii muutlik ning seal püsis madalam temperatuur.

Kuivenduse järgselt alaneb veetase, paraneb pindmise kihi õhustatust ja suureneb aeroobsete lagundajate populatsioon. See kiirendab orgaanilise aine lagundamist ja suurendab CO₂ voo hulka (Kaisel & Kohv, 2009; Maanso, 2015). Uurimistöö kinnitas, et süsihappegaasi voog mulla ja maaepalse madala taimestiku hingamisega, oli negatiivses korrelatsioonis veetasemega, mis oli kooskõlas varasemate tehtud uurimuste tulemustega (Järveoja, 2011, Maanso, 2015).

Kuivendatud alade temperatuuri amplituudid kõikumised on kõvasti suuremad, kui looduslikul märgalal või vähe kuivendatud märgalal. Pidev temperatuuri kõikumine ja öökülma rohke esinemine mõjutab mikroobide lagundamisprotsesse. (Kaisel & Kohv, 2009) Kõige kõrgemad CO₂ tasemed esinesid kaasikus 2, kus veerežiim oli kõige muutlikum. Soodustades kaasiku muutumist süsiniku sidujast emiteerijaks. Kaasikus 1 oli pärsitud süsihappegaasi emissioon tekkimine mullas liigse kuivuse tõttu. Kaasikus 3 oli kõige ühtlasem veetase vahetult süsihappegaasi sidumisele ja emissioonile, mille tõttu ei paistnud kolmas ala eriti silma.

Kõikidel aladel oli tugev negatiivne seos süsihappegaasi emissiooni ja veetaseme vahel ehk mida madalam oli veetase (suvel) seda suurem oli emissioon. Selline tingimus oli kõige paremini täidetud kaasikus 3, kus oli suurim positiivne korrelatsioon gaasi emissiooni ja veetaseme vahel. Kaasikus 1 puudus 2014. aastal veetase täielikult suvel ja sügisel, siis polnud soodustatud

süsihappegaasi tekkimine ja emissioon. Üldiselt kõikides kaasikutes oli 2015. aastal veetase madalam, kui süsihappegaasi emissioon ei suurem uuritud kolmes kaasikus.

On leitud, et mullaniiskus on hooajaliselt lumega kaetud metsaökosüsteemides süsinikuvoogude peamine määraja (Gutenberg et al., 2019, Viru, 2020). Sellegipoolest leiti nõrk positiivne seos mullaniiskuse ja CO₂ voo vahel kaasikutes 1 ja 3. Mõlemal alal esines 2015. aastal oluline seos süsihappegaasi emissiooniga, kuna niiskus tõusis ja see pärsis gaasi lendumist, oli emissiooni kogus väiksem võrreldes eelmise aastaga.

Kuivendamise käigus rajatud kraavisüsteem mõjutab looduse keskkonda ja ka ümbritsevate alade veerežiimi ning mikrokliimat. Kõige efektiivsemalt mõjutab kuivendamine ala, mis asub kraavide lähedal. (Kaisel & Kohv, 2009, Viru, 2020) Käesolevas uurimistöös tuli välja, et erinevatelt kraavikaugustelt mõõdetud süsihappegaasi vood ei erinenud üksteisest. Vähesel määral erinesid tulemused 5m läheduses kuivenduskraavile, kus esines kõrgemaid emissioone, sest veetase oli madalam. Erinevus emissioonis oli ka alade vahel erinevates kraavi kaugustes – kaasikus 2 esines suurem emissioon kui alal 1 ja 3, mis olid sarnaste emissiooni kogustega erineval kaugusel kraavist. Üldiselt kraavi lähedal mõõdetud punktides oli suurem süsihappegaasi emissioon kui kaugemal punktides. Selline tulemus leiti kaasikus 1 (kuiv) ja 2 (kohati kuiv). Kaasik 3 oli CO₂ emissioon suurim lähimas ja kaugemas mõõtmispunktis, millest järeldub, et kraavidel pole olulist mõju ala mullaniiskuse režiimile.

Aastane voog on kooskõlas keskkonnaparametrite tulemustega. Kõige väiksem emissioon oli kaasikust 1, sest nii veetase, mullaniiskus kui -temperatuurid olid madalamad võrreldes teiste kaasikutega. Liigne kuivus ei ole soodne kasvamiseks ja seetõttu ei ole ka suurt hingamist. Kaasikus 2 ja 3 olid keskkonnatingimused soodsad ja nendelt kahelt alalt oli ka süsihappegaasi tekkimine aastas suurim (Tabel 1).

4.2 CH₄ voog

Metaani sünteesitakse anaeroobses pinnasekihis metanogeensete mikroobide elutegevuse käigus (Vainio, 2019). „Mitmed uuringu tulemused näitavad, et CH₄ tootmine ning CH₄ tarbimine on seotud mulla füüsikaliste omaduste ja veesisaldusega, sealhulgas tekstuuri ja pinnase mahulise veesisaldusega“ (Clément *et al.*, 2020).

Keskmine metaani voog varieerus kolmel alal laias ulatuses, jäädes vahemikku $-83,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kuni $313,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kaasikus 1 oli gaasi sidumine väikseim ($-35,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kui kaasikus 3 ($-38,7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), kuid nendes kaasikutes seoti pidevalt metaani. Kaasikus 2 oli suurim emissioon, mis esines peamiselt 2014. aastal ($40,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja 2015. aastal toimus metaani sidumine ($-24,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Vaadates kahte aastat eraldi, siis 2014. aasta näidud olid kõrgemad kõikides kaasikutes (sidumises või emissioonis) kui 2015. aastal. Metaani sidumisel ja emissiooni tugevnemisel esines sessioone muster. Metaani sidumine oli nõrgim talve ja kevadel, kui muld oli kõige märjem. Kaasik 2 alal saavutas metaani emissioon tipu juulis ja sellele järgnes kiire langus. Sügisel oli tugevam sidumine (Lisa 1, Joonis 2).

Metaanivoogudele oli iseloomulik uurimisala sisene varieeruvus (von Arnold *et al.*, 2005). Seda mõjutavad erinevad kaugustel kuivenduskraavis varieeruvad niiskustingimused. Peamised metaanivoogu mõjutavad tegurid oli aasta keskmine veetase, pH ja turbatusedus (Clément *et al.*, 2020).

Käesoleva töö tulemused kinnitasid eelnevaid väiteid. Kraavid mõjutasid veetaset nii palju, et kaasikus 1 ja 2 kehtis seos, mida kaugemalt kraavist tulemusi mõõdeti, seda vähem mõjutasid kuivendus kraavid gaasivoogusid. Kaasiku 1 metaani sidumine vähenes kraavist eemale liikudes. Kaasik 2 kehtis vastupidine seos metaani emissiooni suurenemisega, sest veetase ei mõjutanud kaugeid mõõtmispunkte nii palju kui kraavi läheduses. Kaasikus 3 kuivenduskraavi kaugus ei mõjutanud veerežiimi ja metaani sidumine oli pidev igas punktis. Kaasik 2 ja 3 aladel oli 40 m kaugusel kuivenduskraavist metaani emissioonid madalamad võrreldes teiste mõõtmispunksidega.

Pinnase niiskus ja temperatuur on teadaolevalt olulised tegurid, mis kontrollivad muldade CH_4 voogu. Temperatuuri mõju on väiksem kui mullaniiskuse mõju. (Vaino, 2019, Tuittila *et al.*, 2004) Tehtud töö kinnitab Vaino (2019) ja Tuittila (2004) uuringutes leitud seost temperatuuridega. Kaasikutes 1 ja 3 leiti oluline negatiivne seos mullatemperatuuride vahel. Seos kinnitas, et temperatuuri kõikumine ja madalamad kraadid (0°C läheduses) soodustavad metaani lendumist, sest mikroobide aktiivsus tõuseb. Kõrgemad mullatemperatuurid ja veetaseme olemasolu nagu kaasikus 2 oli 2014. aastal, soodustas veel suuremat metaani emissiooni. 2015. aastal olnud madalam mullatemperatuuri soodustas metaani sidumist mullas. Kiiresti varieeruv 0–5 cm kiht ei soodusta mullas metaani sidumist ega lendumist.

Metaani vooge võib mõjutada aeroobse turbakihi puudumine ning anaeroobsete lagunemisprotsesside samaaegne esinemine. Metaani voogude kujunemisel on olulise tähtsusega kõrge veetaseme vegetatsiooniperioodi alguses, sest soojenev pinnas ja paranev toitainete kättesaadavus soodustavad metanogeneesi (Köster *et al.*, 2018).

Kaasikus 1 ei olnud soodustatud metaani emissioon ja sidumine, sest veetase oli pidevalt all pool turbakihi paksust ehk kuiv. Veetaseme vaheldumine, mis toimus kaasikus 3 soodustas, vaid metaani sidumist, kuna veetase jäi maapinna sügavusse. Veetaseme alanemine soodustas metaani sidumist ja seetõttu ei leitud seost 2014. aastal kaasikus 2, sest veetase oli kõrge ja toimus gaasi emissioon.

Mullaniiskuse suurenemine piirab gaaside difusiooni mullas, mis omakorda reguleerib hapniku tingimusi, mis seejärel mõjutab taas CH₄ tarbimist ja tootmist. CH₄ voog oli seotud peamiselt mullaniiskusega ülemises 5 cm-s kihis (Gutenberg, 2019). Käesolevas töös selgus, et kõikides kaasikutes esines mullaniiskusega seos 2015. aastal ja see oli tugevaim kaasikus 3, mis oli uurimisaladest kõige märjem. Madal mullaniiskus soodustas metaani sidumist kõikides kaasikutes sel aastal.

Kaasikud 1 ja 3 olid metaani aastased voo negatiivsed ehk aladel toimus metaani sidumine. 2014. oli sidumine nõrgem ja 2015. aastal kahe kaasiku metaani sidumine tugevnes. Seda soodustas üldine mullatemperatuuri langus. Kaasikus 2 oli 2014. aastal metaani emissioon, sest veetase kõikus antud alal kõige rohkem ning maapind oli korraks isegi üle ujutatud. Lisaks mõjutas kõrgem mullatemperatuur, mis kiirendas mikroobide elutegevust. Veetase ja mullatemperatuur olid 2015. aastal kaasikus 2 madalad, mistõttu toimus antud alal metaani sidumine aasta lõikes.

Kokkuvõte

Üle maailma on kuivendatud soomassiive metsa kasvatamise eesmärgil. Soode kuivendustöödega alustati Eestis 19. sajandil ja intensiivne metsakuivendus kestis 1980ndate lõpuni. Selle ajal kuivendati Eestis üle 560 000 ha maa ala ja sellest esimeste seas oli Järvelja Öppe- ja Katsemetskonnas.

Kuivendamisega hüdroloogiline režiim muutub, mullahingamine suureneb, sest hapniku juurdepääs on tagatud mulda. Mullas aktiveerub pindmises kihis orgaanilise aine lagundamine ning seeläbi suureneb oksüdatsioonil eralduva süsihappegaasi kogus. Samaaegselt väheneb metaani emissioon, sest seda sünteesitakse anaeroobses pinnasekihis kõrge veetaseme korral. Põhjaveetaseme tõstmine vähendaks süsihappegaasi heitkoguseid, kuid võib intensiivistada metaani heitekoguseid.

Antud bakalaureusetöös kasutatud kasvuhoonegaaside CO₂ ja CH₄ emissiooni ja sidumise ning keskkonnaparameetrite andmed koguti eelnevalt Järvelja Öppe- ja Katsemetskonnas (Joonis 1) läbi viidud teadusprojekti raames. Välitööd toimusid kolme kuni nelja nädala tagant kahe aasta jooksul (aprillist 2014 märtsini 2016). Uuring viidi läbi kolmes kuivendatud sookaasikus, kus mõõtmisi teostati kuivenduskraavist 5, 15, 40 ning 80 m kaugusel. Gaasimõõtmiste kõrvalt mõõdeti ka keskkonnaparameetreid: veetaseme sügavus, mullatemperatuur (0–5, 10, 20, 30, 40 cm) ja –niiskus (0–5 cm). Andmete analüüsimisel uuriti kasvuhoonegaaside voogude aastate vahelist varieeruvust ning leiti seosed keskkonnaparameetrite vahel.

Käesolevas töös sai kinnitust, et süsihappegaasi vood olid positiivselt tugevas seoses õhu- ja mullatemperatuuriga. Suvel kui temperatuurid olid kõrgemad, oli soodustatud suurem süsihappegaasi lendumine mullast. Enamasti oli kõikides kaasikutes suurim emissioon augustis. Suurim CO₂ emissioon 310 mg C m⁻² h⁻¹ esines kaasikus 2 augustis 2015.a. Talviti oli CO₂ voog sookaasiku muldadest oluliselt väiksem võrreldes sooja perioodiga. Kõige väiksem oli see kaasikus 1 veebruaris 3 mg C m⁻² h⁻¹.

CO₂ emissioonid aastate vahel ei erinenud. 2014. aastal oli kõikides kaasikutes suurem CO₂ emissioon kui 2015. aastal. Kõrgeim oli süsihappegaasi emissioonid kaasikus 2 (111 mg C m⁻² h⁻¹) ja madalaimad kaasikus 1 (70 mg C m⁻² h⁻¹). Madalaim keskmine CO₂ emissiooni uurimisperioodil oli kaasikus 1, vaatamata sellele, et selle ala mullas ei olnud pidevalt veetaset. CO₂ emissiooni ja mullaniiskusega ning veetasemega olulist tugevat seost ei leitud.

Kraavile lähedal oli CO₂ emissioon suurem ja intensiivsem, sest veetase ja samuti mullaniiskus olid madalam.

Töös arvutati õhutemperatuuri aastase käigu järgi CO₂ lendumine kõigil aladel eraldi mõlema uurimisperioodi kohta. Kaasikus 1 oli aastane emissioon poole väiksem võrreldes teiste aladega. Kaasik 3 oli emissioon kõrgem kui kaasikust 1. CO₂ emissioon kaasikust 2 olid kõige kõrgemad. Keskmise CO₂ emissioon kuivendatud sookaasikust oli 537 g C m⁻² a⁻¹.

Antud uurimisaladel toimus valdavalt metaani sidumine. Kaasikutes 1 ja 3 seoti metaani keskmiselt 283 mg C m⁻² 2014. a. ning 345 mg C m⁻² 2015. aastal. 2014. a. emiteerus CH₄ kaasikust 2 373 mg C m⁻² ja järgmine aasta seoti metaani 195 mg C m⁻² a⁻¹.

Kuivenduslik kraavi võrk mõjutas kõige rohkem kaasikut 1 ja 2, kus kraavist kaugemal oli sidumine nõrgem või emissioon suurem. Kaasikut 3 ei mõjutanud rajatud kraavid ja pidev sidumine toimus igas mõõtmispunktis sama tugevalt. Kaasik 2 metaani voogude mõõtmised näitasid, et kõrgema veetaseme ja mullatemperatuur korral oli soodustatud ka suurim metaani emissioon. Metaani sidumise ja mullaniiskuse vahel ei leitud olulist seost.

Antud töös leidis kinnitus CO₂ ja CH₄ voogude seos õhu- ja mullatemperatuuriga ning mullaniiskuse ja veetasemega. Töös on esmakordselt arvutatud õhutemperatuuri ja CO₂ emissiooni vahelise usaldusväärse funktsiooniga CO₂ aastane voog kuivendatud Eesti kõdusoo kaasikute kohta.

Summary

Carbon dioxide and methane flows from drained birch forest soils

Author: Merilin Mägi

Peatlands have been drained over the world to afforest the areas. Drainage works began in Estonia in the 19th century and intensive forest drainage lasted until the late 1980s. There were drained over 560,000 ha of land in Estonia (Kaisel & Kohv, 2009), and among the first was the Järvelja Study and Experimental Forest (Kask, 2014).

Drainage causes the changes in the hydrological regime and the increase of soil respiration, because oxygen access ensures to the top soil. The population of aerobic decomposers is activated in the soil surface layer, thus the decomposition of organic matter is accelerated and it increases the amount of carbon dioxide released during oxidation (Kaisel & Kohv, 2009; von Arnold et al., 2005). At the same time, methane emission reduces, because methane is produced in the anaerobic soil layer with high water level (Kaisel & Kohv, 2009). High groundwater levels in these areas would reduce CO₂ emissions, but could intensify methane emissions (Järveoja, 2011; Köster et al., 2018).

The main objectives of the study were to:

Analyse how much CO₂ and CH₄ are emitted from drained forest soils?

Analyse the relationship between CO₂ and CH₄ and environmental factors?

Compare how much CO₂ and CH₄ emissions can vary between study years?

Compare how much CO₂ and CH₄ emissions can vary at different distances from the drainage ditch?

Data on greenhouse gas fluxes and environmental factors were obtained during previous fieldwork in Järvelja Study and Experiment Forest (Figure 1). Fieldwork took place every three to four weeks during two years (from April 2014 to March 2016). The study was carried out in three drained forests, where measurements were performed at a distance of 5, 15, 40 and 80 m

from the drainage ditch. In addition to gas measurements, environmental parameters were also measured: water level depth, soil temperature (0-5, 10, 20, 30, 40 cm) and soil moisture (0–5 cm). The data analysis examined the variability of greenhouse gas flows over the years and found the relationships between environmental factors. Statistica 7 program and Excel were used for data analysis. Differences between study sites and years were analyzed and also the correlation between gas flux and environmental factors.

The main results of the paper showed high CO₂-C emissions from drained peatland forests (average emissions varied in a range of 0.3 mg C m⁻² h⁻¹ to 313.2 mg C m⁻² h⁻¹) and emissions were related with soil temperature and groundwater level depth. Soil respiration was smaller in birch site 1 (average emission 70.3 mg C m⁻² h⁻¹). In birch site 2, the two-year average emission was the highest 110.6 mg C m⁻² h⁻¹ and in the birch site 3 was same results 96.4 mg C m⁻² h⁻¹.

Methane sequestration was also weakest in birch 1 for two years (-35.3 µg C m⁻² h⁻¹). Methane sequestration the highest for all three sites in birch site 3(-38.7 µg C m⁻² h⁻¹). There was methane average emission 40.9 µg C m⁻² h⁻¹ in birch site 2 in 2014. Two years average remained also emitting (6.2 µg C m⁻² h⁻¹).

There was strong relationship between gas fluxes and environmental factors (chapters 3.3. and 3.4.): air and soil temperature, water level depth. High temperatures activated microbes and increased CO₂ emissions. Also, low water levels increase soil aeration and CO₂ emissions. There was opposite relationship between methane fluxes and soil temperature and water level. For both gases (CO₂ and CH₄), no significant relationship with soil moisture was found.

The presence of ditches affected the variability of the water level. CO₂ emission was higher close to the ditch and along drainage gradient it decreased. The opposite relationship was found for methane emission or sequestration. However, in general, there was no significant relationship between distance from drainage ditch and gas emissions.

The carbon dioxide emissions from birch site 1 and 3 were lower in 2014 than in 2015. The annual CO₂ flux in birch site 1 was 355 g C m⁻² y⁻¹ in 2014 and 394 g C m⁻² y⁻¹ in 2015. CO₂ emission from site 2 was 562 g C m⁻² y⁻¹ in 2014 and 685 g C m⁻² y⁻¹ in 2015. Emissions of CO₂ from site 3 were similar in 2014 and in 2015, were 602 g C m⁻² y⁻¹ and 621 g C m⁻² y⁻¹, respectively.

Methane sequestration was -217 mg C m⁻² y⁻¹ for 2014 and -339 mg C m⁻² y⁻¹ for 2015 in site 1 and same results for site 3 were -295 mg C m⁻² y⁻¹ and -351 mg C m⁻² y⁻¹, respectively. The flux

from birch site 2 was very variable during two years study. There was CH₄ emission 373 mg C m⁻² y⁻¹ from the soil in 2014 and CH₄ sequestration -195 mg C m⁻² y⁻¹ in 2015.

In this work a clear relationship between CO₂ and CH₄ fluxes and air and soil temperature, as well as soil moisture and water level depth was confirmed. For the first time, the annual CO₂ flux for drained birch forest soil in Estonia was calculated using statistically significant function between study sites air temperature and measured CO₂ emissions.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada juhendajaid Martin Maddisoni ja Ülo Manderit oskusliku juhendamise ja kannatlikkus eest. Lisaks kõiki teisi asjaosalisi, kes aitasid kaasa töö valmimisele.

Käesolevas bakalaureusetöös kasutati andmeid, mis koguti RMK rakendusuuringute projekti „Muudetud veerežiimiga metsade süsiniku ja lämmastikuringe“ raames.

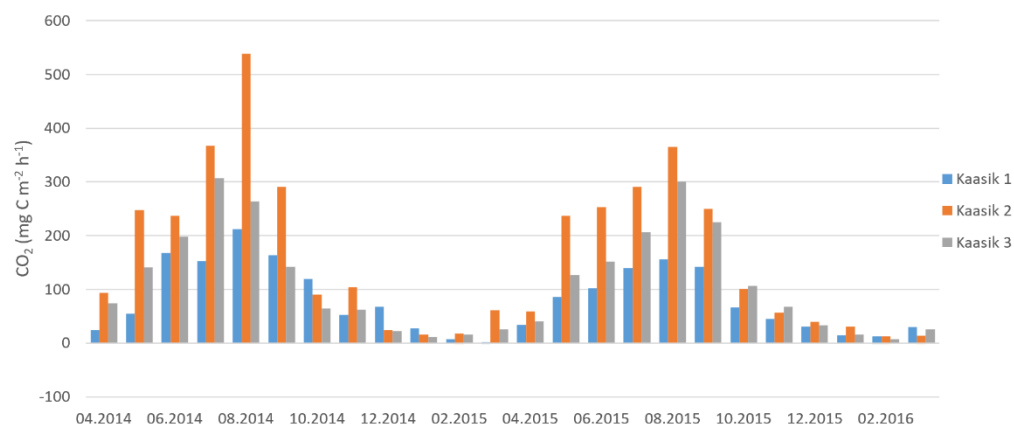
Kirjandus

- Belger, L., Forsberg, B. R., & Melack, J. M. (2011). Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. *Biogeochemistry*, 105(1–3), 171–183.
- Boer, Y. de. (2008). *Kyoto Protocol Reference Manual*. United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC.
https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449.
- Carmichael, M., Bernhardt, E., Bräuer, S., & Smith, W. (2014). The role of vegetation in methane flux to the atmosphere: Should vegetation be included as a distinct category in the global methane budget? *Biogeochemistry*, 119(1), 1–24.
- Clément, R., Pärn, J., Maddison, M., Henine, H., Chaumont, C., Tournebize, J., Uri, V., Espenberg, M., Günther, T., & Mander, Ü. (2020). Frequency-domain electromagnetic induction for upscaling greenhouse gas fluxes in two hemiboreal drained peatland forests. *Journal of Applied Geophysics*, 173, 103944.
- Ernfors, M., Björk, R. G., Noursatpour, A., Rayner, D., Weslien, P., & Klemetsson, L. (2020). Greenhouse gas dynamics of a well-drained afforested agricultural peatland. *Boreal Environment Research*, 25, 65–77.
- Gauci, V., Gowing, D. J., Hornibrook, E. R., Davis, J. M., & Dise, N. B. (2010). Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment*, 44(17), 2157–2160.
- Gutenberg, L., Krauss, K. W., Qu, J. J., Ahn, C., Hogan, D., Zhu, Z., & Xu, C. (2019). Carbon dioxide emissions and methane flux from forested wetland soils of the great dismal swamp, USA. *Environmental Management*, 64(2), 190–200.

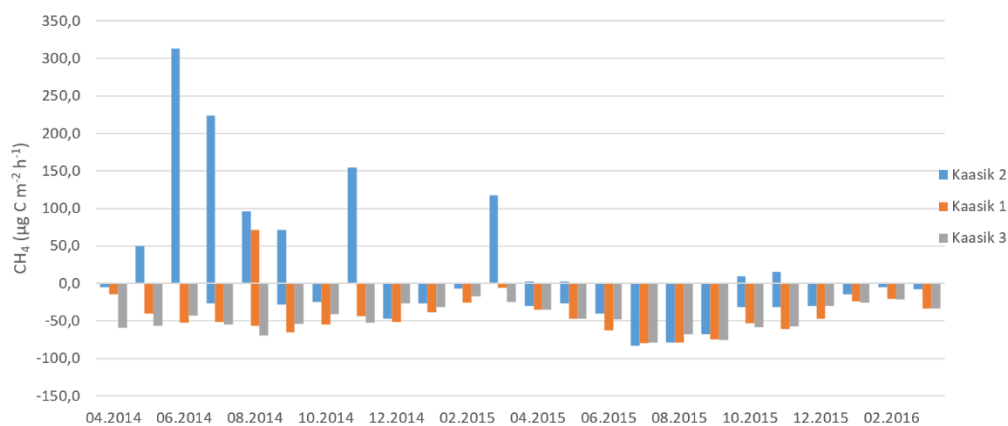
- Järveoja, J. (2011). *Kasvuhoonegaaside emissioon päideroo abil rekultiveeritavalt turbatootmisalalt* [Magistritöö]. Tartu Ülikool Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond.
- Kaisel, M., & Kohv, K. (2009). *Metsakuivenduse keskkonnamõju ülevaade*. Eestimaa Loodus Fond. https://media.voog.com/0000/0037/1265/files/kuivenduseKM_ELF-1.pdf
- Kask, P. (2014). *Järvelja Õppe- ja Katsemetskond*.
<https://jarvelja.ee/sihtasutusest/metsanduslik-info/>
- Köster, E., Köster, K., Berninger, F., Prokushkin, A., Aaltonen, H., Zhou, X., & Pumpanen, J. (2018). Changes in fluxes of carbon dioxide and methane caused by fire in Siberian boreal forest with continuous permafrost. *Journal of Environmental Management*, 228, 405–415.
- Maa-ameti geoportaal*. (n.d.). <http://geoportaal.maaamet.ee>
- Maanso, H. (2015). *Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsadest* [Magistritöö]. Tartu Ülikool Loodus- ja tehnoloogiateaduskond Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond.
- Nordhaus, W. D. (1977). Economic growth and climate: The carbon dioxide problem. *The American Economic Review*, 67(1), 341–346.
- Rafferty, J. P. (2021). Methane chemical compound. In *Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/methane>
- Saunois, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregon, A., Ciais, P., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., & others. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, 8(2), 697–751.
- Tuittila, E.-S., Vasander, H., & Laine, J. (2004). Sensitivity of C sequestration in reintroduced Sphagnum to water-level variation in a cutaway peatland. *Restoration Ecology*, 12(4), 483–493.

- Univer, M. J. (2020). *Metaanivood Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamas aastatel 2013–2019* [Bakalaureusetöö]. Tartu Ülikool Loodus- ja tehnoloogiateaduskond Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond.
- Vainio, E. (2019). *The contributions of soil, ground vegetation and trees to the methane exchange of boreal forest*. Helsinki University.
- Viru, B. (2020). *Snow cover dynamics and its impact on greenhouse gas fluxes in drained peatlands in Estonia* [Doktoritöö]. Tartu Ülikool Loodus- ja tehnoloogiateaduskond Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond.
- von Arnold, K., Nilsson, M., H\aanell, B., Weslien, P., & Klemedtsson, L. (2005). Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained organic soils in deciduous forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(6), 1059–1071.
- Wuebbles, D. J., & Hayhoe, K. (2002). Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57(3–4), 177–210.

Lisa 1



Joonis 1. Uurimisalade keskmine süsihappegaasi voog (mg C m⁻² h⁻¹) kahe aasta kohta.



Joonis 2. Uurimisalade keskmine metaanivoog (µg C m⁻² h⁻¹) kahe aasta kohta.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Merilin Mägi,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Süsihappegaasi- ja metaanivoog sookaasikute mullast“, mille juhendajad on Ülo Mander ja Martin Maddison, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Merilin Mägi

24.05.2021